



Cork to enhance damage tolerant composite systems

Pedro Miguel Cardoso Queirós

em12163@fe.up.pt

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Ramo de Projeto e Construção Mecânica

Orientador: Prof. Doutor António Torres Marques (FEUP)

Coorientador: Dr. Paulo Nóvoa (FEUP)

Porto, setembro de 2016

“Tudo o que tu podes alcançar está à distância da tua coragem para arriscar.”

- Raul Minh'alma

Página intencionalmente deixada em branco.

RESUMO

Os materiais compósitos laminados possuem uma elevada eficiência estrutural, mas esta é bastante comprometida pela baixa resistência a cargas de impacto. Por esse motivo decidiu-se estudar um método de melhorar a tolerância ao dano de materiais compósitos laminados através da introdução de filmes de cortiça entre camadas de fibra de vidro. Fabricaram-se oito placas laminadas com configurações diferentes, fazendo-se variar o número de filmes de cortiça e a sua posição entre quatro camadas de fibra de vidro. O objetivo foi perceber qual a influência da posição e quantidade dos filmes de cortiça na melhoria da tolerância ao dano de um compósito. As placas foram de seguida divididas em dezenas de provetes e realizados ensaios de tração, flexão, impacto, indentação e tração após impacto. Depois de analisados os resultados constatou-se que a introdução da cortiça reduz substancialmente as propriedades mecânicas do material, o que era previsível. Concluiu-se ainda que após impactos de dois e quatro joules as placas com cortiça apresentaram reduções inferiores de propriedades mecânicas, quando comparadas com a placa de referência sem cortiça.

Palavras-chave: Impacto; Cortiça; Laminados; Tolerância ao dano.

Página intencionalmente deixada em branco.

ABSTRACT

Laminated composite materials have a high structural efficiency, but it is greatly affected by the relatively low resistance to impact loads. For this reason it was decided to study a method to enhance the damage tolerance of laminated composites by introducing cork films between glass fiber layers. Eight laminated plates with different configurations were manufactured, making it vary the number of cork films and their position among four glass fiber layers. The aim was to understand the influence of the position and quantity of cork films to enhance damage tolerance of a composite. The plates were then divided into dozens of specimens and carried out tensile, bending, impact, indentation and traction after impact tests. After analyzing the results it was found that the introduction of cork substantially reduces the mechanical properties of the material, which was predictable. It was also concluded that after impact of two and four joules, the plates with cork showed less reduction of the mechanical properties when compared to the reference plate without cork.

Keywords: Impact; Cork; Laminates; Damage tolerance.

Página intencionalmente deixada em branco.

AGRADECIMENTOS

O meu sincero agradecimento ao meu orientador Prof. Doutor António Torres Marques pela atenção e disponibilidade que demonstrou sempre que precisei, bem como as sugestões e correções que melhoraram este trabalho.

Agradecer ao meu coorientador Dr. Paulo Nóvoa que foi um verdadeiro braço direito ao longo dos meses em que estive a realizar este trabalho, estando presente do início ao fim deste percurso.

Quero agradecer à minha mãe por nunca ter desistido do sonho de ver os seus filhos formados. Esta dissertação é também para ela o culminar de muitos anos de esforço.

Por fim um agradecimento à Amorim Cork Composites (ACC), especialmente ao Eng. Lino Rocha, pela contribuição para este trabalho com a oferta do filme de aglomerado de cortiça. E ainda à Andreia Durães, do INEGI, pela sua disponibilidade em facilitar a realização dos ensaios de forma concertada com o planeamento do trabalho experimental.

Página intencionalmente deixada em branco.

ÍNDICE

Lista de figuras.....	xiii
Lista de tabelas.....	xvii
Abreviaturas, siglas e acrónimos	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Estrutura	2
2 Fundamentação teórica.....	3
2.1 Materiais compósitos	3
2.1.1 Compósitos estruturais.....	4
2.2 Materiais constituintes de um sistema compósito	8
2.2.1 Reforço.....	8
2.2.2 Matriz.....	9
2.2.3 Cortiça	11
2.3 Compósitos híbridos	15
2.4 Biocompósitos.....	16
2.5 Processos de fabrico de um compósito	17
2.5.1 Moldação manual	17
2.5.2 Moldação por vácuo	18
2.6 Impacto a baixa velocidade.....	19
2.6.1 Tipos básicos de dano.....	20
2.6.2 Dano após impacto.....	23
2.6.3 Tolerância ao dano.....	24
3 Procedimento experimental	27
3.1 Produção dos laminados.....	27

3.1.1	Preparação dos filmes de cortiça	29
3.1.2	Preparação da chapa-molde	29
3.1.3	Preparação da resina	30
3.1.4	Processamento dos laminados	31
3.2	Preparação dos provetes	35
4	Ensaaios, resultados e análise	37
4.1	Ensaaios de flexão	37
4.1.1	Resultados obtidos nos ensaios de flexão	39
4.1.2	Análise dos resultados dos ensaios de flexão	47
4.2	Ensaaios de tração	50
4.2.1	Resultados obtidos nos ensaios de tração	51
4.2.2	Análise dos resultados dos ensaios de tração	59
4.3	Ensaaios de impacto	61
4.3.1	Resultados obtidos nos ensaios de impacto	62
4.3.2	Análise dos resultados dos ensaios de impacto	70
4.4	Ensaaios de indentação	74
4.4.1	Resultados obtidos nos ensaios de indentação	74
4.4.2	Análise dos resultados dos ensaios de indentação	77
4.5	Ensaaios de tração após impacto (TAI)	78
4.5.1	Resultados obtidos nos ensaios TAI	80
4.5.2	Análise dos resultados dos ensaios TAI	88
5	Conclusão	93
5.1	Trabalhos futuros	94
6	Bibliografia	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema classificativo dos diferentes tipos de compósitos ²	4
Figura 2 - Imagem esquemática de um painel em estrutura sandwich com um núcleo em favo de mel ²	5
Figura 3 - Esquema das orientações possíveis das fibras das várias camadas que constituem um compósito laminado. (Esquerda) camadas sobrepostas com as fibras segundo a mesma direção; (Direita) camadas com as fibras orientadas segundo direções distintas ⁶	7
Figura 4 - Efeito da orientação das fibras num laminado quando sujeito a esforços de tração, compressão e corte ⁷	7
Figura 5 - Evolução das cadeias moleculares da resina durante o processo de cura ¹⁰	10
Figura 6 - Comparação da resistência à tração e rigidez de diferentes resinas ¹¹	11
Figura 7 - Composição química da cortiça ¹³	12
Figura 8 - Lâminas de aglomerado de cortiça ²⁷	13
Figura 9 - Cortiça nas pás de turbinas ¹³	14
Figura 10 - Placa feita de grânulos de cortiça e pasta de papel ¹⁷	15
Figura 11 - Comparação dos valores do módulo de elasticidade e tensão máxima entre diferentes polímeros no estado puro e com cortiça ¹⁹	16
Figura 12 - Processo de moldação manual ²¹	18
Figura 13 - Moldação por vácuo ²¹	19
Figura 14 - Descolagem entre a fibra e a matriz ²³	20
Figura 15 - Modos básicos de delaminação num material compósito ¹	22
Figura 16 - Deformação permanente vs energia de impacto ²⁶	23
Figura 17 - Tolerância ao dano ²²	25
Figura 18 - Imagens reais das oito placas produzidas.	28
Figura 19 - Corte de filmes de cortiça.	29
Figura 20 - Aplicação de cera na chapa-molde.	30

Figura 21 - Homogeneização da mistura resina/endurecedor.....	30
Figura 22 - Aplicação da primeira camada de resina.	31
Figura 23 - Aplicação da fibra de vidro (esquerda) e impregnação da fibra por pressão (direita).	32
Figura 24 - Aplicação do filme de cortiça (esquerda) e impregnação do filme por pressão (direita).	32
Figura 25 - Impregnação da última camada da placa C2C3C.....	33
Figura 26 - Aplicação do peel ply (esquerda), e aplicação do breather (direita).....	33
Figura 27 - Colagem do saco de vácuo (esquerda), e desmoldação da placa (direita).	34
Figura 28 - Corte da placa (esquerda), e placa com os primeiros cortes para provetes (direita).	34
Figura 29 - Ensaio de flexão.....	38
Figura 30 - Curva Tensão vs Deformação (C0).....	39
Figura 31 - Curva Tensão vs Deformação (1C2).....	40
Figura 32 - Curva Tensão vs Deformação (3C4).....	41
Figura 33 - Curva Tensão vs Deformação (2C3).....	42
Figura 34 - Curva Tensão vs Deformação (C2C).	43
Figura 35 - Curva Tensão vs Deformação (C3C).	44
Figura 36 - Curva Tensão vs Deformação (C23C).	45
Figura 37 - Curva Tensão vs Deformação (C2C3C).	46
Figura 38 - Tensão máxima média à flexão.	47
Figura 39 - Módulo de elasticidade médio à flexão.	48
Figura 40 - Deformação máxima média à flexão.....	49
Figura 41 - Ensaio de tração.	50
Figura 42 - Curva Tensão vs Deformação (C0).....	51
Figura 43 - Curva Tensão vs Deformação (1C2).....	52

Figura 44 - Curva Tensão vs Deformação (3C4).....	53
Figura 45 - Curva Tensão vs Deformação (2C3).....	54
Figura 46 - Curva Tensão vs Deformação (C2C).	55
Figura 47 - Curva Tensão vs Deformação (C3C).	56
Figura 48 - Curva Tensão vs Deformação (C23C).	57
Figura 49 - Curva Tensão vs Deformação (C2C3C).	58
Figura 50 - Tensão máxima média à tração.	59
Figura 51 - Módulo de elasticidade médio à tração.	60
Figura 52 - Deformação máxima média à tração.	60
Figura 53 - Ensaio de impacto.....	61
Figura 54 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa C0.	62
Figura 55 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa 1C2.	63
Figura 56 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa 3C4.	64
Figura 57 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa 2C3.	65
Figura 58 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa C2C. ...	66
Figura 59 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa C3C. ...	67
Figura 60 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa C23C. .	68
Figura 61 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa C2C3C.	69
Figura 62 - Comparação dos gráficos Força vs Tempo da placa C0 (esquerda) e 3C4 (direita).	70
Figura 63 - Comparação da força máxima em função da energia de impacto.	72
Figura 64 - Comparação da deflexão final em função da energia de impacto.	72
Figura 65 - Comparação da energia absorvida em função da energia de impacto.	73
Figura 66 – Ensaio de indentação.....	74

Figura 67 - Comparação dos resultados de indentação agrupados por nível de energia.	77
Figura 68 - Esquemas de fixação para impacto numa placa plana (esquerda) ²⁸ e numa placa curva (direita) ²⁹	78
Figura 69 - Sequência de produção do casquilho (2x).	79
Figura 70 - Sequência de produção do impactor.	79
Figura 71 - Curva Tensão vs Deformação (C0).	80
Figura 72 - Curva Tensão vs Deformação (1C2).	81
Figura 73 - Curva Tensão vs Deformação (3C4).	82
Figura 74 - Curva Tensão vs Deformação (2C3).	83
Figura 75 - Curva Tensão vs Deformação (C2C).	84
Figura 76 - Curva Tensão vs Deformação (C3C).	85
Figura 77 - Curva Tensão vs Deformação (C23C).	86
Figura 78 - Curva Tensão vs Deformação (C2C3C).	87
Figura 79 - Comparação da tensão máxima e módulo de elasticidade à tração após impacto.	88
Figura 80 - Tensão máxima e módulo de elasticidade à tração, com e sem impacto (2J).	89
Figura 81 - A - Provete TAI impactados (8J); B - Provete posicionado no suporte fabricado propositadamente para o ensaio; C - Provete tracionado após impacto.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações das placas.....	28
Tabela 2 - Especificações dos provetes de cada ensaio.	35
Tabela 3 - Velocidade do ensaio de flexão para cada placa.	38
Tabela 4 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa C0.	39
Tabela 5 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa 1C2.	40
Tabela 6 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa 3C4.	41
Tabela 7 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa 2C3.	42
Tabela 8 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa C2C.....	43
Tabela 9 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa C3C.....	44
Tabela 10 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa C23C.....	45
Tabela 11 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa C2C3C.	46
Tabela 12 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa C0.....	51
Tabela 13 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa 1C2.....	52
Tabela 14 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa 3C4.....	53
Tabela 15 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa 2C3.....	54
Tabela 16 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa C2C.	55
Tabela 17 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa C3C.	56
Tabela 18 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa C23C.	57
Tabela 19 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa C2C3C.....	58
Tabela 20 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa C0.	62
Tabela 21 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa 1C2.	63
Tabela 22 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa 3C4.	64
Tabela 23 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa 2C3.	65
Tabela 24 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa C2C.....	66

Tabela 25 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa C3C.....	67
Tabela 26 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa C23C.....	68
Tabela 27 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa C2C3C.	69
Tabela 28 - Valores médios de indentação para a placa C0, em mm.	74
Tabela 29 - Valores médios de indentação para a placa 1C2, em mm.	75
Tabela 30 - Valores médios de indentação para a placa 3C4, em mm.	75
Tabela 31 - Valores médios de indentação para a placa 2C3, em mm.	75
Tabela 32 - Valores médios de indentação para a placa C2C, em mm.	75
Tabela 33 - Valores médios de indentação para a placa C3C, em mm.	76
Tabela 34 - Valores médios de indentação para a placa C23C, em mm.	76
Tabela 35 - Valores médios de indentação para a placa C2C3C, em mm.	76
Tabela 36 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa C0.	80
Tabela 37 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa 1C2.	81
Tabela 38 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa 3C4.	82
Tabela 39 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa 2C3.	83
Tabela 40 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa C2C.....	84
Tabela 41 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa C3C.....	85
Tabela 42 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa C23C.....	86
Tabela 43 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa C2C3C.	87
Tabela 44 - Redução da tensão máxima e módulo de elasticidade após um impacto de 2J.....	90
Tabela 45 - Redução da tensão máxima e módulo de elasticidade após um impacto de 4J.....	90
Tabela 46 - Redução da tensão máxima e módulo de elasticidade após um impacto de 8J.....	91

ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

BVID – Barely Visible Impact Damage

INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

PVA – Álcool polivinílico

TAI – Tração Após Impacto

b – Largura do provete (m)

h – Espessura do provete (m)

v – Velocidade do ensaio de flexão (m/s)

σ_f – Tensão à flexão (MPa)

ε_f – Deformação à flexão (%)

E – Módulo de elasticidade (GPa)

σ_t – Tensão à tração (MPa)

ε_t – Deformação à tração (%)

L_0 – Distância entre as duas agarras do extensómetro (m)

ΔL_0 – Incremento da distância entre as duas agarras do extensómetro (m)

Página intencionalmente deixada em branco.

1 INTRODUÇÃO

A competitividade é o combustível da inovação. Nesse sentido, e no âmbito da engenharia mecânica e de materiais, urge uma necessidade das empresas desenvolverem novos materiais que consigam conjugar baixa densidade com boas propriedades específicas e bom desempenho, sem descuidar das questões económicas que se pretende sempre serem as mais vantajosas. Quando se trata de grandes produções em série estes aspetos ganham ainda mais relevância, como é o caso da indústria automobilística. E é neste caso que os compósitos têm uma importante palavra a dizer e onde têm proliferado em grande escala. Não só na indústria automobilística mas também na aeronáutica.

Especialmente nestas duas indústrias, pelo facto dos seus produtos estarem em constante movimento, seja a altas ou baixas velocidades, estarão constantemente sujeitos a situações de impacto. Situações essas que vão desde um impacto de uma bola no capô do carro ao impacto de um bando de pássaros na asa de um avião a alta velocidade. Por esse motivo, as análises da resistência ao impacto (capacidade de um material não sofrer danos permanentes) e da tolerância ao dano (capacidade de um material manter as suas funções operacionais após sofrer danos permanentes) são de extrema importância.

Com intenção de melhorar a tolerância ao dano das estruturas compósitas, que compõem grande parte dos veículos construídos atualmente, têm sido estudados e experimentados diversos tipos de materiais. Um deles é precisamente a cortiça. Sendo ela um material natural de elevada versatilidade que concentra propriedades muito específicas como baixa densidade, alta compressibilidade e flexibilidade, isolamento térmico e acústico, torna-se num material de elevado interesse no que à tolerância ao dano diz respeito. Nesse sentido, o presente trabalho pretende avaliar a importância da cortiça na melhoria da tolerância ao dano de estruturas compósitas, neste caso laminados, a impactos de baixa velocidade. Com essa finalidade foi necessário definir objetivos e estruturar devidamente a ordem de trabalhos.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é perceber de que forma a cortiça pode melhorar a tolerância ao dano de um material compósito. Com esse objetivo em mente, decidiu-se produzir sete placas laminadas com um, dois e três filmes de cortiça e com sequências de empilhamento distintas, e uma oitava placa de referência sem qualquer filme de cortiça. Depois de ensaiadas todas as placas e analisados os resultados pretendeu-se saber se as soluções com filmes de cortiça são ou não vantajosas em termos de tolerância ao dano e, se sim, qual ou quais as configurações que reúnem o maior número de aspetos positivos. De uma forma colateral pretende-se também saber qual a influência da introdução da cortiça num laminado e de que forma se pode tirar benefícios dela, nomeadamente no processo de deteção do dano.

1.2 ESTRUTURA

Capítulo 1 – Introdução ao tema e exposição dos objetivos desta experiência;

Capítulo 2 – Levantamento bibliográfico dos conceitos teóricos inerentes a este trabalho;

Capítulo 3 – Descrição do procedimento experimental efetuado, mais concretamente o processo de fabrico e corte das placas laminadas;

Capítulo 4 – Descrição dos ensaios realizados para a caracterização do material, exposição dos resultados obtidos nesses ensaios e análise detalhada dos mesmos;

Capítulo 5 – Apresentação das conclusões que foram possíveis retirar deste estudo experimental, bem como a sugestão de possíveis trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

A constante evolução das tecnologias e a crescente competitividade dos produtos e dos mercados levam à necessidade de uma boa combinação dos materiais tradicionais (metálicos, cerâmicos e poliméricos). Desta forma surgiram os materiais compósitos. Os materiais compósitos são compostos por duas ou mais fases numa escala macroscópica, cujo desempenho mecânico e propriedades são projetados para serem superiores às dos materiais constituintes quando atuam de forma independente. Uma das fases é normalmente descontínua, mais dura e mais resistente, e é chamada de reforço. A fase menos rígida e menos resistente é contínua e é designada de matriz¹.

As propriedades dos compósitos são função das propriedades das fases que os constituem, das suas quantidades relativas, e da geometria da fase descontínua. "Geometria da fase descontínua", neste contexto, refere-se à forma e ao tamanho das fibras, assim como à sua distribuição e orientação².

Os objetivos do processo de fabrico de materiais compósitos são:

- Conseguir um produto consistente, controlando a espessura, volume e orientação das fibras;
- Minimizar os espaços vazios;
- Reduzir tensões residuais internas;
- Usar processos menos dispendiosos.

Para atingir estes objetivos é necessário definir:

- Material e sua configuração;
- Ferramentas;
- Processos³.

Mais à frente, no capítulo 3, estes pontos serão exemplificados quando se expuser o procedimento experimental aplicado no contexto deste trabalho.

Os sistemas compósitos podem ser divididos em três grupos (ver **Figura 1**): compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras, e compósitos estruturais. A fase descontínua para compósitos reforçados por partículas é equiaxial, ou seja, as dimensões das partículas são aproximadamente as mesmas em todas as direções. Para os compósitos reforçados por fibras, a fase descontínua tem a geometria de uma fibra, ou seja, tem uma elevada razão entre o comprimento e o diâmetro. Por fim os materiais compósitos estruturais são combinações de materiais compósitos e homogêneos (apresentam as mesmas propriedades em todas as partes)².

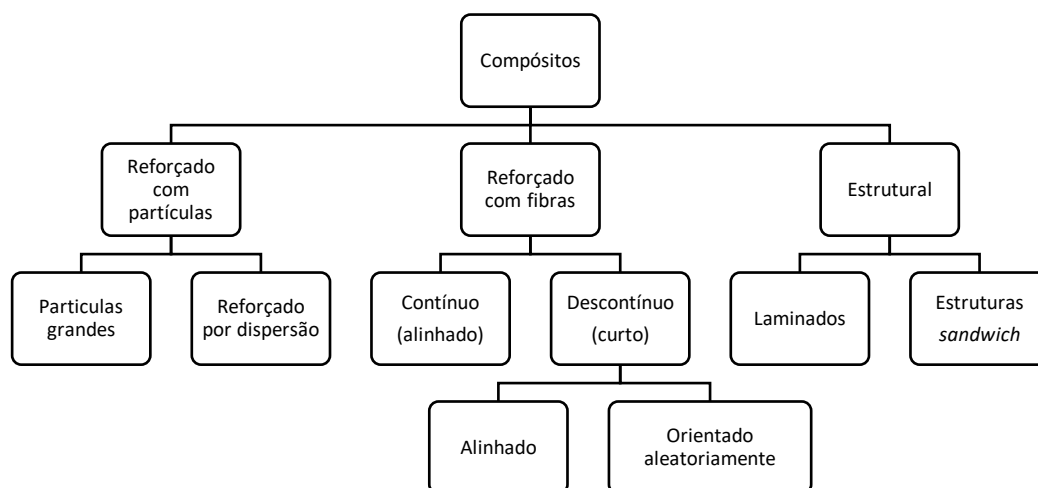


Figura 1 - Esquema classificativo dos diferentes tipos de compósitos².

2.1.1 Compósitos estruturais

Os compósitos estruturais, que são o foco deste trabalho, são compostos tanto por materiais homogêneos como por materiais compósitos, como referido anteriormente, cujas propriedades dependem não apenas dos materiais constituintes, mas também do *design* geométrico dos vários elementos estruturais. Os dois tipos de compósitos estruturais mais comuns são as estruturas *sandwich* e os laminados².

O presente trabalho é especificamente sobre laminados. No entanto, serão referidas também as estruturas *sandwich* uma vez que estas apresentam na sua composição estruturas que podem ser consideradas laminados (as camadas

exteriores). Além do facto de serem o grande “rival” dos laminados no mundo dos compósitos e como tal ser importante comparar as características mecânicas e funcionais de ambos para um melhor entendimento da aplicabilidade do presente estudo.

2.1.1.1 Estruturas *Sandwich*

As estruturas *sandwich* são projetadas para serem vigas ou painéis com uma elevada rigidez e resistência. Um painel formado por uma estrutura *sandwich* é composto por duas lâminas ou faces exteriores que estão adesivamente ligadas a um núcleo bastante mais espesso. As lâminas exteriores são feitas de um material rígido e forte, como ligas de alumínio, materiais plásticos reforçados com fibras, ou aço, conferindo desta forma uma elevada rigidez e resistência a toda a estrutura. O núcleo é bastante mais espesso para resistir a esforços de tração e tensões de compressão. O material que constitui o núcleo é leve e com um baixo módulo de elasticidade. Estes materiais podem ser espumas poliméricas (poliuretanos, por exemplo), madeira, ou estruturas em “favos de mel”, como se pode ver na **Figura 2**. Este tipo de núcleo é bastante popular e consiste em células hexagonais ligadas entre si e formadas por uma película fina, normalmente uma liga de alumínio ou um polímero de aramida. A rigidez deste tipo de núcleo depende do tamanho da célula, espessura da parede celular, e o material a partir do qual o “favo de mel” é feito².

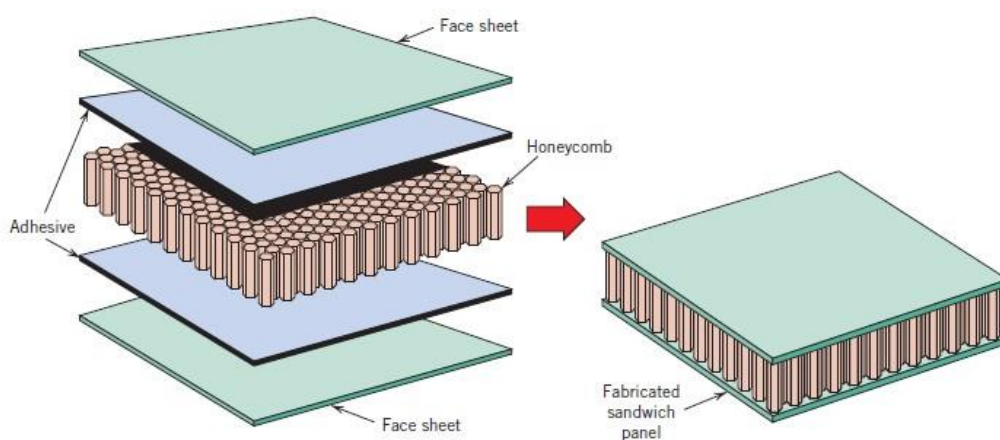


Figura 2 - Imagem esquemática de um painel em estrutura *sandwich* com um núcleo em favo de mel².

A rigidez à flexão e a resistência de um painel em estrutura *sandwich* pode ser aumentada de forma significativa em comparação com um laminado ou placa com o mesmo material que as lâminas exteriores da estrutura *sandwich*, com um aumento muito pequeno do seu peso. A rigidez à flexão e a resistência adicionais dependerão da espessura dessas lâminas, a profundidade e densidade do núcleo, e da força de ligação adesiva. Normalmente, um laminado precisa de um reforço, seja ele colado ou fixado mecanicamente, para evitar ou reduzir a encurvadura do próprio material. Nesse aspeto, um painel em estrutura *sandwich* torna-se vantajoso uma vez que alcança o mesmo desempenho, de uma forma geral, do que o laminado, mas sem os elementos de rigidez adicionais e os custos de fabrico⁴.

Painéis formados por estruturas *sandwich* são utilizados numa grande variedade de aplicações, incluindo telhados, pavimentos, paredes de edifícios, e ainda na indústria aeroespacial e aeronaves, sendo aplicadas, por exemplo, nas asas e fuselagem das mesmas².

2.1.1.2 Compósitos laminados

Dentro dos compósitos estruturais, a par das estruturas *sandwich*, estão os compósitos laminados, que foi o tipo de compósito estrutural selecionado para a execução desta experiência. Um laminado é um conjunto de lâminas (ou camadas) empilhadas para alcançar a rigidez e espessura desejada. Por exemplo, lâminas unidireccionais podem ser empilhadas para que as fibras de cada lâmina estejam orientadas na mesma ou em diferentes direções (ver **Figura 3**). A sequência de várias camadas com diferentes orientações num laminado designa-se por sequência de empilhamento. Estas camadas são, normalmente, ligadas entre si com o mesmo material da matriz que é aplicada a uma só lâmina, não sendo por isso necessário adicionar mais material. A sequência de empilhamento e as propriedades do material de cada lâmina proporcionam uma maior flexibilidade aos *designers* para adaptarem a rigidez e resistência do laminado às exigências estruturais⁵.

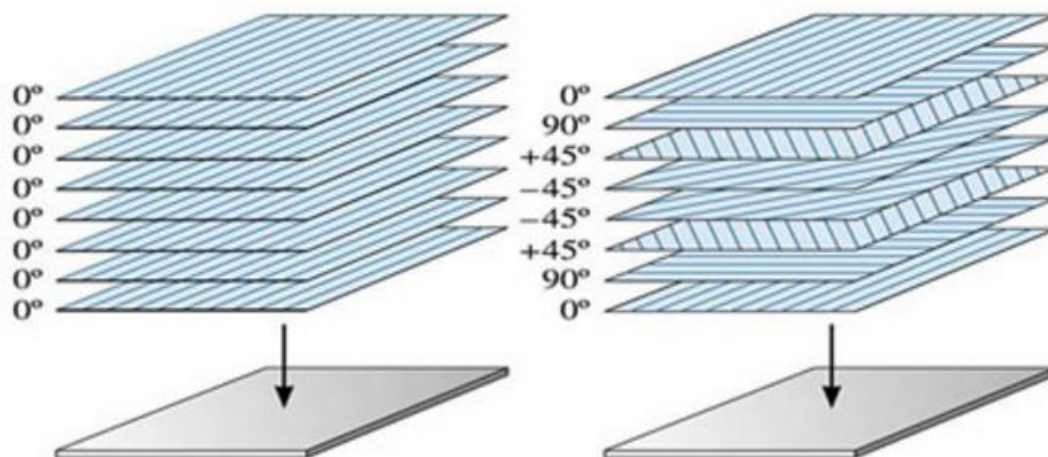


Figura 3 - Esquema das orientações possíveis das fibras das várias camadas que constituem um compósito laminado. (Esquerda) camadas sobrepostas com as fibras segundo a mesma direção; (Direita) camadas com as fibras orientadas segundo direções distintas⁶.

Um laminado unidirecional (as fibras de todas as lâminas têm a mesma orientação) será muito resistente ao longo da direção das fibras e pouco resistente segundo a direção transversa. O laminado é também pouco resistente quando sujeito a forças de corte (ver **Figura 4**).

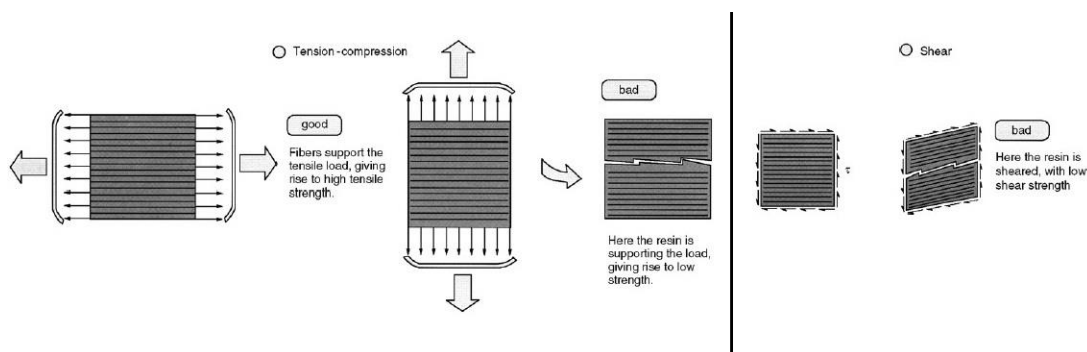


Figura 4 - Efeito da orientação das fibras num laminado quando sujeito a esforços de tração, compressão e corte⁷.

Compósitos laminados contendo camadas de dois ou mais tipos diferentes de materiais de reforço são chamados compósitos híbridos. Por exemplo, um laminado pode ser constituído por camadas de vidro/epóxico, carbono/epóxico e aramida/epóxico empilhadas em conjunto numa sequência específica¹. O que

pode ser considerado o caso de presente trabalho onde são estudadas sequências de camadas vidro/epóxico e cortiça/epóxico num laminado. Mais à frente, o tema dos compósitos híbridos será abordado com maior profundidade.

Uma das mais importantes vantagens dos laminados é que a sua anisotropia ou as suas propriedades podem ser efetivamente controladas. Isto é, os valores das propriedades em diferentes direções podem ser manipuladas alterando o material e as suas variáveis de fabrico. Por exemplo, num compósito unidirecional a razão entre a rigidez longitudinal e transversa pode ser alterada variando a fração volúmica de fibras⁸.

Por causa das tensões de corte geradas entre as camadas, especialmente nos bordos do laminado, pode ocorrer delaminação. O que representa uma grande desvantagem. Além disso, durante o processo de fabrico de laminados, é comum ocorrerem defeitos no material, tais como vazios interlaminares, orientação incorreta das camadas ou fibras danificadas, que acabam por prejudicar a qualidade do produto final⁵.

2.2 MATERIAIS CONSTITUINTES DE UM SISTEMA COMPÓSITO

2.2.1 Reforço

O reforço de um sistema compósito é a sua componente resistente e por isso de maior relevo para a finalidade do material. Uma grande variedade de fibras estão disponíveis como reforço para os compósitos como, por exemplo, fibras de vidro, boro, carbono, ou Kevlar[®]. As características desejáveis da maior parte das fibras de reforço são a alta resistência, alta rigidez e densidade relativamente baixa. As fibras de carbono, por exemplo, são o reforço mais aplicado em compósitos avançados de matriz polimérica por apresentarem o mais elevado módulo de elasticidade específico e resistência específica de todas as fibras utilizadas como reforço. Já o Kevlar[®] tem como aspetos positivos uma elevada resistência à tração e baixa densidade, no entanto, tem como desvantagem a baixa resistência à compressão. Por outro lado, as fibras de boro têm uma

elevada resistência à compressão, mas apresentam como principal aspecto negativo o seu elevado custo¹.

A fibra utilizada no presente trabalho foi a fibra de vidro. A sua vasta aplicação deve-se às suas vantagens tais como a elevada resistência à tração, em comparação com outras fibras têxteis; resistência ao fogo, uma vez que a fibra de vidro é inorgânica não queima; excelente resistência química à maioria dos produtos químicos e ainda, devido ao seu baixo coeficiente de dilatação linear térmico e elevado coeficiente de condutibilidade térmica, a fibra de vidro exibe um excelente desempenho em ambientes térmicos³.

Dentro do universo da fibra de vidro existem diversas categorias, destacando-se a vidro-E, vidro-R e vidro-S que são as mais utilizadas em compósitos estruturais. A fibra utilizada nesta experiência foi de tipo E que é, de longe, a mais utilizada, entre todas as fibras disponíveis para reforço estrutural e é, ainda, a menos dispendiosa. A fibra de vidro do tipo E é conhecida na indústria como uma fibra de aplicação geral com boa resistência mecânica e elevada resistividade elétrica⁹.

2.2.2 Matriz

O papel principal da matriz é o de proporcionar proteção e suporte para as fibras e a transferência de esforços de uma fibra para outra. As matrizes usadas em compósitos podem ser poliméricas, metálicas, cerâmicas ou de carbono. As matrizes mais usadas são as poliméricas, que podem ser termoendurecíveis ou termoplásticas. As resinas termoendurecíveis, como é o caso dos poliésteres ou da resina de epóxido, sofrem polimerização e reticulação durante a cura com o auxílio de um agente endurecedor e aquecimento¹. O processo de cura inicia-se com o crescimento e ramificação das cadeias moleculares, que irá provocar um aumento do peso molecular e consequentemente um aumento de viscosidade da resina. O processo de transformação de líquido viscoso em gel elástico, ou borracha, é irreversível e designa-se de gelificação (*gel point*)¹⁰.

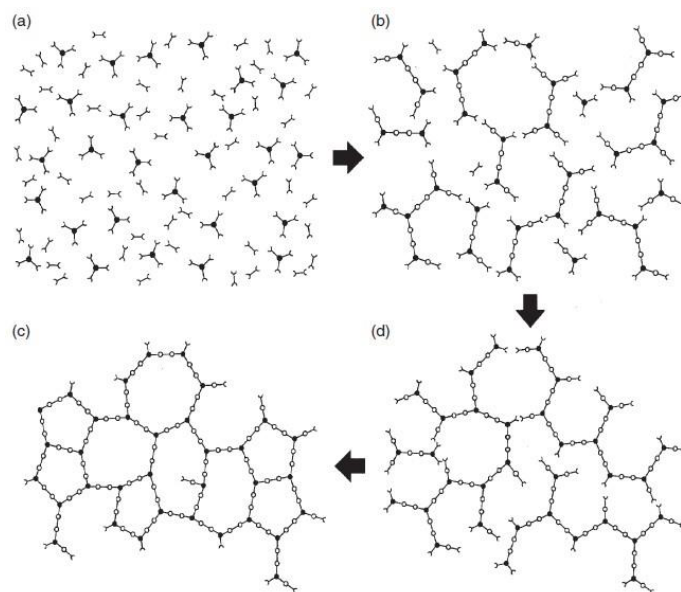


Figura 5 - Evolução das cadeias moleculares da resina durante o processo de cura¹⁰.

Um aspeto importante a ter em conta durante o período de cura da resina é a sua contração. Este fenómeno deve-se ao rearranjo das moléculas de resina na fase líquida e semilíquida, representado na **Figura 5**. O poliéster insaturado, por exemplo, requer um rearranjo molecular considerável para atingir o seu estado curado e pode contrair até 8%. A natureza diferente da reação da resina de epóxido, por outro lado, provoca um baixo rearranjo molecular, sem a presença de subprodutos voláteis, resultando numa contração reduzida, cerca de 2%. O que contribui, em parte, para uma melhoria das propriedades mecânicas em comparação com o poliéster insaturado, uma vez que a contração está associada ao aparecimento de tensões internas que podem enfraquecer o material¹¹.

Duas importantes propriedades mecânicas de qualquer resina são a sua resistência à tração e rigidez. A **Figura 6** mostra os resultados para os testes realizados no poliéster insaturado, éster de vinilo e resina de epóxido curados a 20°C e 80°C. Após um período de cura de sete dias à temperatura ambiente, pode ser visto que a resina de epóxido terá propriedades mais elevadas do que um poliéster insaturado ou um éster de vinilo, tanto a nível de resistência como

de rigidez. O efeito benéfico de uma pós-cura a 80°C durante cinco horas também pode ser visto¹¹.

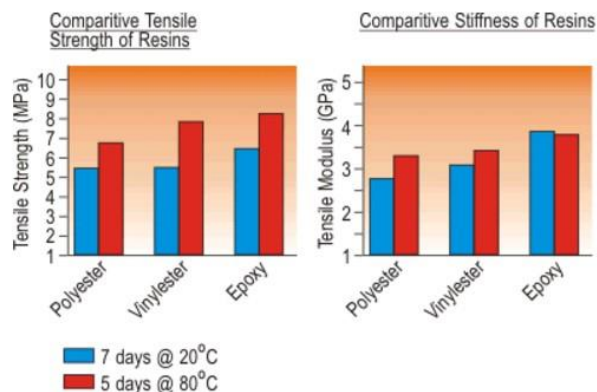


Figura 6 - Comparação da resistência à tração e rigidez de diferentes resinas¹¹.

As resinas de epóxido têm sido as matrizes mais utilizadas para compósitos avançados. Estas resinas são mais caras do que os poliésteres e não têm tão boas capacidades a altas temperaturas como as poliimidas. No entanto apresentam outras vantagens que justificam a sua ampla utilização, tais como a ausência de subprodutos formados durante a cura; baixa contração durante a cura; resistência a solventes e produtos químicos; resistência à fluência e fadiga e ainda boas propriedades elétricas³.

2.2.3 Cortiça

Depois de analisadas a fibra de vidro e a resina de epóxido, nos dois subcapítulos anteriores, é o momento de analisar o terceiro componente do sistema compósito fabricado no contexto desta experiência: a cortiça, que é uma das mais versáteis matérias-primas naturais conhecidas. A União Europeia é o maior produtor mundial de cortiça e Portugal, que possui cerca de 60% da área total de sobreiro, fornece aproximadamente 80% da cortiça produzida no mundo. Este facto torna ainda mais interessante o estudo da aplicabilidade deste material no universo dos sistemas compósitos. Aliando a crescente presença na indústria destes sistemas com as propriedades únicas deste material “nacional”

pode resultar num importante leque de soluções empreendedoras para a economia portuguesa. São apresentadas, de seguida, algumas das características da cortiça para um melhor entendimento das possíveis vantagens da sua aplicação.

A cortiça é um material de origem vegetal retirado da casca do sobreiro, sendo um tecido de suberose composto por células mortas. Pode ser descrita como um tecido homogéneo de células de paredes finas com disposição regular e sem espaço intercelular. Uma estrutura que se assemelha a um favo de mel¹². Esta configuração celular permite que mais de 50% do seu volume seja ar, o que a torna muito leve (pesa apenas 0,16 gramas por centímetro cúbico)¹³. Tal explica a baixa densidade e a elevada compressibilidade, flexibilidade e capacidade de isolamento, características deste material. As suas células consistem em formações de geometria idêntica à de um prisma hexagonal¹².

2.2.3.1 Composição química

O grande segredo da cortiça reside na mistura de gases semelhante ao ar, que preenche cada uma das células, e na percentagem de suberina contida nas suas paredes. A elevada percentagem gasosa de cada célula é responsável pela elevada leveza, compressibilidade e elasticidade. Desta forma, a cortiça pode ser comprimida até metade do seu tamanho, sem perder qualquer flexibilidade¹³. Estas características são muito interessantes no que respeita a situações de impacto.

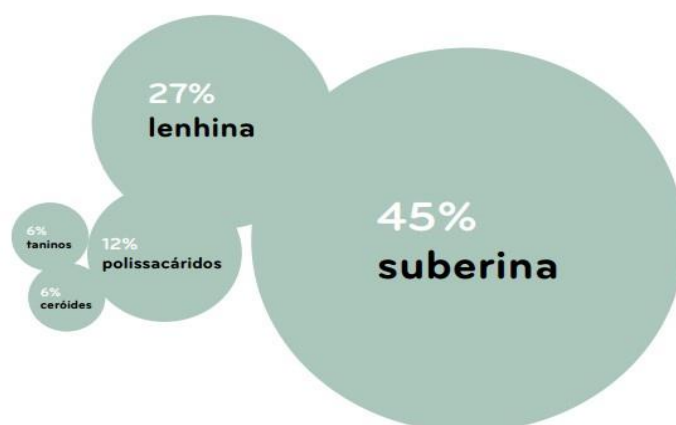


Figura 7 - Composição química da cortiça¹³.

2.2.3.2 Aglomerados de cortiça

Abordar o tema dos aglomerados de cortiça é essencial neste trabalho tendo em conta que a cortiça utilizada em compósitos aparece geralmente sob a forma de um aglomerado. Estes aglomerados são produzidos através da ligação de grãos de cortiça, conseguida com o uso de ligantes, como por exemplo o poliuretano, sendo depois a mistura compactada sob ação de pressão e temperatura. O granulado provém da cortiça virgem e da cortiça que não apresenta qualidade para o fabrico de rolhas. A cortiça, depois de triturada e convertida num granulado, é classificada e separada de acordo com o tamanho de grão e densidade. Estes granulados podem ser usados como um produto final em várias aplicações ou, como neste caso, usados como matéria-prima para a produção de um aglomerado. Depois de triturada, classificada e separada a cortiça é depois compactada em moldes, em regra, paralelepípedicos, que são depois cortados sob a forma de lâminas e alvo de processos de acabamento superficial¹⁴.



Figura 8 - Lâminas de aglomerado de cortiça²⁷.

O resultado de testes experimentais revelou que o desempenho dos aglomerados de cortiça depende, essencialmente, do tamanho de grão, da densidade e do processo utilizado na ligação dos grãos. Em função da aplicação, estes parâmetros podem ser ajustados de modo a obter as propriedades obtidas, nomeadamente propriedades superiores às dos materiais convencionais¹⁴.

2.2.3.3 Aplicações da cortiça

As aplicações da cortiça vão muito mais além das tão conhecidas rolhas. No ramo da indústria ela é utilizada como isolamento acústico e vibrático. É usada em máquinas, como compressores, prensas hidráulicas, turbinas, geradores e motores. Como isolamento vibrático pode ser aplicada entre o maciço de fundação e a laje onde se instala a máquina, ou aplicada diretamente entre a base da máquina e o pavimento ao qual está ligada. O aglomerado de cortiça também é utilizado no revestimento de tubagens. A sua utilização neutraliza os dois principais inimigos de instalações frigoríficas, que são o calor e a humidade¹⁵.

Desempenha igualmente um papel relevante na construção de pontes e autoestradas, nos caminhos-de-ferro, nas barragens, nos aeroportos e na geração de energia. No caso da energia eólica, a cortiça é incorporada nas pás das turbinas, como se pode observar na **Figura 9**. Também é utilizada no controlo da poluição, seja integrada em produtos absorventes de óleos, solventes orgânicos ou projetada em grânulos por ar comprimido, para renovar monumentos e fachadas de prédios.

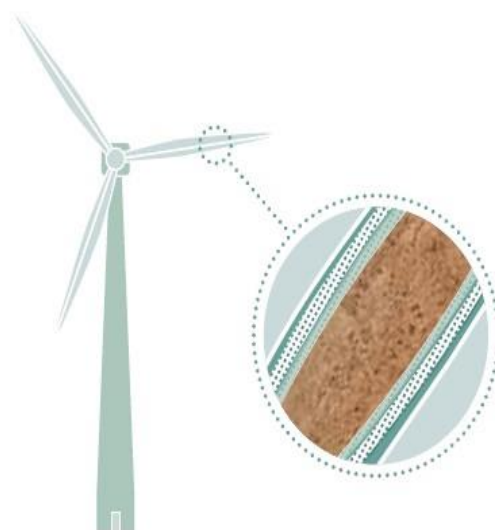


Figura 9 - Cortiça nas pás de turbinas¹³.

Pela sua capacidade de resistência ao choque, está a ser testada também em equipamentos à prova de bala¹³. Um aspeto de especial interesse no contexto deste trabalho. Para o futuro, os bem-sucedidos testes de utilização da cortiça na exploração do espaço alimentam novas expetativas, que passam pela aplicação de compósitos de cortiça num programa interplanetário¹³.

2.3 COMPÓSITOS HÍBRIDOS

Os compósitos híbridos e os biocompósitos, que serão abordados no subcapítulo seguinte, estão intimamente relacionados com o tema do presente trabalho, tendo como elemento comum a aplicação da cortiça. O comportamento dos compósitos híbridos resulta de uma soma ponderada das vantagens e desvantagens inerentes aos componentes que o constituem. Com a aplicação de um compósito híbrido pretende-se que as vantagens de um dos materiais compense as desvantagens do outro, conseguindo-se desta forma um bom equilíbrio custo/desempenho¹⁶. Uma vez que a sustentabilidade do mundo, o crescimento económico e a melhoria da qualidade de vida das pessoas dependem muito do uso de produtos alternativos na arquitetura e construção, este tipo de compósitos ganha especial interesse e importância pela possibilidade de incorporação de resíduos industriais convencionalmente chamados de materiais verdes. Em trabalhos de R. Eires, J.P. Nunes et al¹⁷, compósitos feitos de pasta de papel e granulado de cortiça, incorporando pequenas quantidades de aglutinantes poliméricos e aditivos minerais, foram submetidos a testes para determinar as suas propriedades físicas e mecânicas. Concluiu-se que compósitos de granulados de cortiça e pasta de papel demonstraram ter propriedades adequadas para diversas aplicações não-estruturais na construção, tais como revestimentos de paredes e tetos.



Figura 10 - Placa feita de grânulos de cortiça e pasta de papel¹⁷.

2.4 BIOCOMPÓSITOS

Os biocompósitos são materiais compósitos que contêm uma ou mais fases derivadas a partir de uma origem biológica. Em termos do reforço pode-se considerar fibras de plantas, tais como o algodão e linho. Em termos de matriz, esta pode ser à base de polímeros, de preferência derivados de recursos renováveis¹⁸. Trabalhos recentes de Emanuel M. Fernandes, Vitor M. Correlo et al¹⁹ que consistiram na preparação de biocompósitos resultantes da combinação de diferentes poliésteres alifáticos biodegradáveis com cortiça, concluíram que a introdução da cortiça reduz a densidade de alguns poliésteres, apresenta uma boa ligação física com as matrizes de poliéster de base biológica, e a sua adição não compromete significativamente as propriedades mecânicas à tração. Estes resultados sugerem que os biocompósitos à base de cortiça e polímero são uma alternativa viável para desenvolver materiais compósitos mais sustentáveis, como por exemplo peças para o interior dos automóveis.

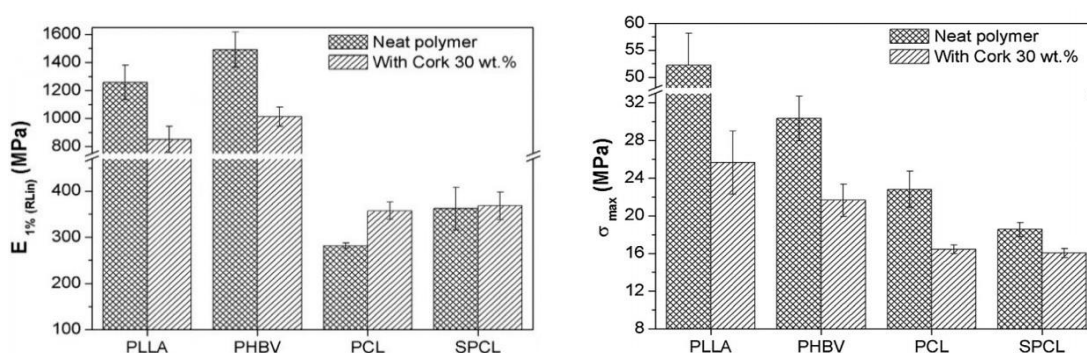


Figura 11 - Comparação dos valores do módulo de elasticidade e tensão máxima entre diferentes polímeros no estado puro e com cortiça¹⁹.

A aplicação de biocompósitos é cada vez maior e mais abrangente, muito por causa de pressões da União Europeia para o uso crescente de materiais recicláveis. É o caso da indústria automobilística onde a diretiva europeia de fim de vida de veículo impôs que desde 2015 os veículos automóveis fossem constituídos por 95% de material reciclável, sendo 85% desse material reciclado através de reutilização ou reciclagem mecânica e 10% reciclado através de recuperação de energia ou reciclagem térmica²⁰.

2.5 PROCESSOS DE FABRICO DE UM COMPÓSITO

Depois de analisados os sistemas compósitos num contexto geral e cada um dos elementos constituintes dos mesmos, com especial foco nos mais relevantes para este trabalho, é o momento de perceber como é feita a ligação de todos estes elementos para a produção de um composto com as características tão específicas como as de um sistema compósito.

As propriedades finais destes sistemas não se determinam apenas em função das características individuais de cada elemento constituinte, mas também, e muito, pelo modo como estes são produzidos. Em todos os processos de fabrico de sistemas compósitos, desde os que incorporam tecnologias mais simples às mais avançadas, existe um conjunto de limitações, nomeadamente no que diz respeito à capacidade de produção, tamanho, forma geométrica, qualidade estrutural, homogeneidade da peça, possibilidade de automatização e custo adicional. Existem diversos processos de fabrico tais como moldação manual, por projeção, por vácuo, pultrusão, enrolamento filamentar, entre outros. Neste subcapítulo serão apenas abordados os processos efetivamente aplicados nesta experiência, são eles a moldação manual e moldação por vácuo. Processos estes que serão analisados com maior detalhe no capítulo 4.

2.5.1 Moldação manual

A moldação manual (*hand lay-up*) é um método de moldação aberta apropriado para fazer uma grande variedade de produtos compósitos desde muito pequenas a muito grandes dimensões. A cadência de produção é bastante limitada, mas é possível melhorá-la através do uso de moldes múltiplos. A moldação manual é o método mais simples de moldação de compósitos, permitindo um baixo investimento em equipamentos, processamento simples, e uma ampla gama de tamanhos de peças, além de que as alterações de *design* são facilmente conseguidas. Com operadores qualificados são obtidos bons índices de produção e qualidade²¹.

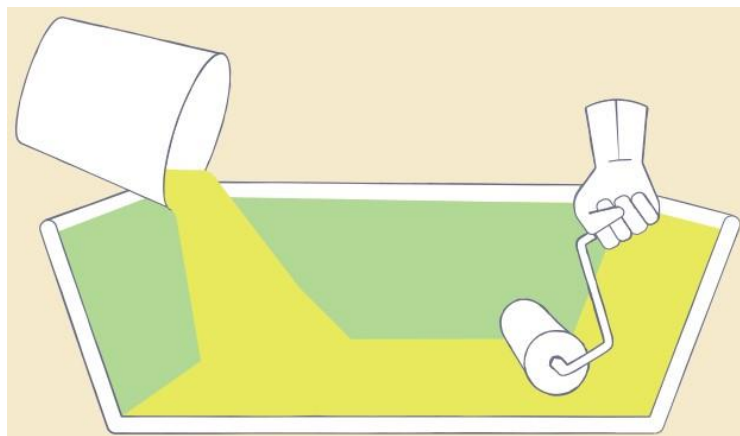


Figura 12 - Processo de moldagem manual²¹.

Primeiramente é aplicada no molde uma camada de desmoldante e de seguida uma de resina usando uma pistola de pulverização, um rolo de pintura ou uma trincha, sendo de seguida aplicada a primeira camada de fibra. O rolo de pintura ou a trincha são usados para consolidar o laminado, molhando completamente o reforço e removendo o ar aprisionado. As camadas subsequentes do laminado são adicionadas para atingir a espessura pretendida segundo uma determinada sequência. No que respeita aos moldes utilizados estes podem apresentar dimensões bastante diferentes e são de relativo baixo custo quando comparados com moldes aplicados noutros processos de fabrico de compósitos²¹.

2.5.2 Moldagem por vácuo

A moldagem por vácuo consiste em aplicar o efeito de vácuo, por exemplo, a um compósito que foi produzido por moldagem manual. Ao reduzir a pressão no interior do saco de vácuo a pressão atmosférica externa exerce força sobre o saco. Essa pressão remove o ar retido e o excesso de resina, compactando desta forma a estrutura compósita. Estruturas fabricadas pelo processo de moldagem manual acabam por se tornar ricas em resina, e a aplicação do vácuo pode eliminar este problema. Além disso, se o processo for bem realizado, consegue-se ainda uma molhagem uniforme da fibra e uma melhoria da ligação das camadas do núcleo do compósito²¹.

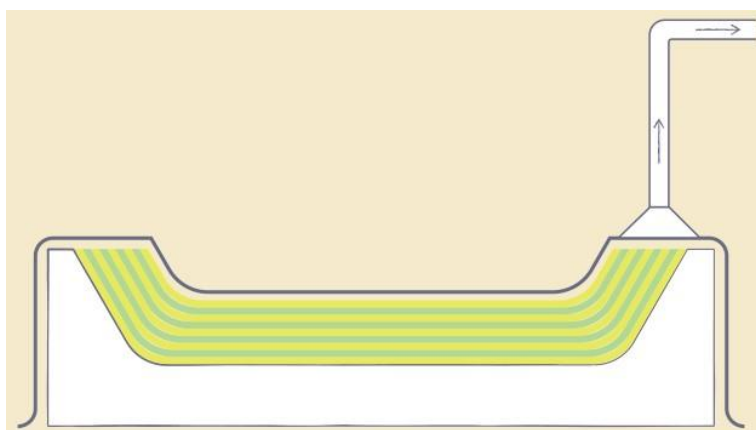


Figura 13 - Moldagem por vácuo²¹.

A forma mais simples de moldagem por vácuo baseia-se na aplicação de um saco de vácuo que consiste numa película flexível (PVA, poliamida, ou polietileno) sobre o compósito, selar os bordos e aplicar o vácuo. Uma forma mais avançada deste processo, e que foi a usada nesta experiência, baseia-se na aplicação de uma película desmoldante ao longo do compósito, e de seguida uma camada de um material absorvente para absorver o excesso de resina e distribuir o efeito de vácuo. É, ainda, colocado um pedaço do material absorvente à entrada do tubo de vácuo para que, com a sucção do ar, o saco de vácuo não obstrua o canal, e por fim é colocado o saco e aplicado o vácuo²¹.

2.6 IMPACTO A BAIXA VELOCIDADE

Depois de produzidos e aplicados no produto final, que por norma estará em constante movimento, os sistemas compósitos estarão permanentemente suscetíveis a situações de impacto. Estes materiais têm uma resistência ao impacto razoável caso a tensão aplicada seja na direção da fibra. Noutras direções eles tendem a ser fracos e a ter uma baixa resistência ao impacto, embora seja um aspeto que depende muito da matriz do material. Pequenos esforços na direção transversal ou tensões inesperadas, devido a um impacto, podem facilmente causar danos. Por sua vez estes danos podem ter origem em diferentes fontes, tais como a presença de uma carga estática, fadiga, impactos

de baixa energia durante o fabrico ou durante o serviço, e ainda em fatores ambientais como a humidade e corrosão. O impacto de baixa energia, em particular, pode ser potencialmente perigoso, pois pode produzir extensas delaminagens subsuperficiais que não são visíveis na superfície do laminado. Provou-se que a presença de danos internos provoca perdas substanciais na resistência e rigidez dos componentes²².

2.6.1 Tipos básicos de dano

Os danos em materiais compósitos ocorrem em diferentes escalas. A nível microscópico, quase não observável, pode-se referir a descolagem fibra/matriz, e a nível macroscópico a fissuração e delaminação²³. Nos subcapítulos seguintes abordar-se-á de uma forma mais profunda cada um dos principais tipos básicos de dano que ocorrem nos materiais compósitos.

2.6.1.1 Descolagem fibra/matriz

A maioria das boas propriedades dos materiais compósitos devem-se a uma forte ligação entre a fibra e a matriz. Quando esta ligação não é suficientemente forte, um dos principais danos que podem ocorrer é a descolagem fibra/matriz (ver **Figura 14**). No entanto, desde que haja boa molhagem entre a matriz e as fibras, e não haja nenhuma porosidade, é raro não existir uma boa ligação entre as fibras e a matriz. Este dano é causado, por exemplo, por fendas causadas pela contração da resina ou tensões térmicas geradas durante o arrefecimento (ou ainda uma combinação de ambos). Tais defeitos são muitas vezes difíceis de detetar, merecendo por isso um especial cuidado e atenção²³.

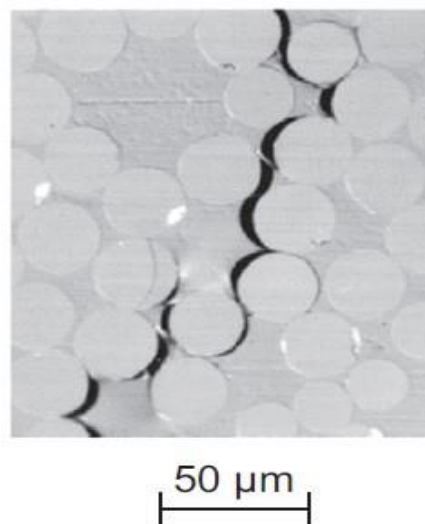


Figura 14 - Descolagem entre a fibra e a matriz²³.

2.6.1.2 Fissuração da matriz

Um dos principais mecanismos de dano dos laminados é a fissuração da matriz, o que é observado em primeiro lugar nas camadas com um ângulo maior entre as fibras e a direção da carga. Depois de iniciada uma fenda transversal na matriz, esta pode propagar-se rapidamente de um lado ao outro da camada²⁴. A velocidade com que a fenda se propaga depende da proximidade com outras fendas, mas não depende do comprimento da mesma, exceto para comprimentos curtos²³.

2.6.1.3 Rotura das fibras

Os compósitos reforçados com fibras são fabricados a partir de feixes de fibras e o tipo de falha de cada fibra dentro do feixe não será o mesmo. Isto deve-se aos diferentes diâmetros das fibras; defeitos introduzidos nas fibras durante o fabrico das mesmas, ou defeitos introduzidos durante o fabrico do compósito (por exemplo arranhões acidentais na superfície da fibra). Assim sendo, as fibras irão romper a diferentes tensões aplicadas, provocando rotura de fibras isoladas. Quando o compósito é sujeito a esforços elevados, a concentração de tensões provocada pela rotura de fibras isoladas poderá provocar a rotura de fibras adjacentes e consequentemente do próprio compósito²³.

Em muitos compósitos, as fibras são revestidas por um material que diminui a probabilidade da rotura de uma fibra provocar a rotura de fibras adjacentes. Isto consegue-se através da formação de uma "região de interface" em torno das fibras que tende a isolar os efeitos da quebra. É também importante notar que as fissuras da matriz numa camada pode causar rotura de fibras numa camada adjacente. Quando a matriz e as fibras têm rigidez e resistência comparáveis, as fibras podem romper muitas vezes ao longo do seu comprimento antes da fratura do compósito. Nesta situação, a rotura das fibras pode causar uma perda significativa de rigidez e resistência³.

2.6.1.4 Delaminagem

Estudos experimentais relatam consistentemente que a delaminagem ocorre apenas nas interfaces entre camadas com diferentes orientações de fibra, em situações de impacto de baixa velocidade, que é o caso do presente trabalho. Se duas camadas adjacentes têm a mesma orientação da fibra, não irá, portanto, ocorrer delaminagem na interface entre elas. Quando um laminado, cujas interfaces são todas entre camadas com diferentes orientações de fibras, é impactado numa das suas faces, a área delaminada, em cada camada, tem uma forma alongada, em forma de amendoim, com o seu eixo maior orientado na direção das fibras²⁵.

Deve notar-se ainda que a delaminagem é geralmente nucleada por outros modos de dano como a quebra da matriz, e, embora seja um modo de dano comum, não é geralmente um modo de falha, por si só. Mesmo que a delaminagem adquira grandes dimensões, não causa, por norma, perda significativa de resistência em situações de engenharia de grandes dimensões. Ainda assim, a perda de integridade pode conduzir a outros modos de dano e falha, por isso deve ser evitada³.

O processo de delaminagem pode ocorrer em três modos básicos: abertura ou desprendimento (modo I); deslizamento ou corte (modo II); rasgamento (modo III), ou sob as suas combinações¹.

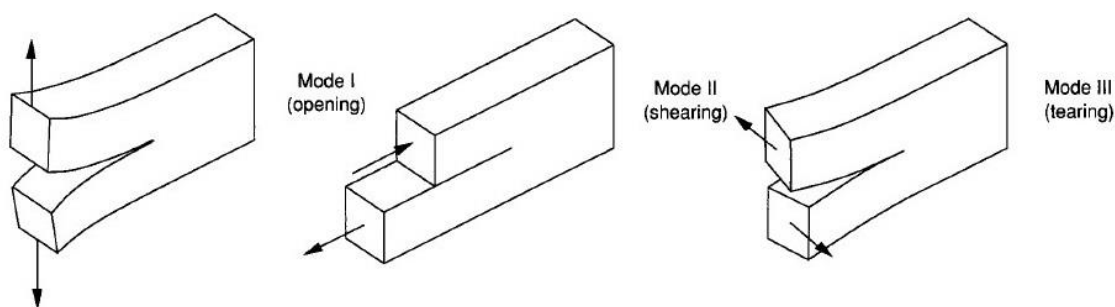


Figura 15 - Modos básicos de delaminagem num material composto¹.

2.6.2 Dano após impacto

Para se entender melhor o contexto do dano associado especificamente a situações de impacto, que é o foco deste trabalho, irá analisar-se de uma forma pormenorizada a **Figura 16**. Além de traduzir o dano provocado num compósito quando sujeito a um impacto, este gráfico permite ainda perceber em que situações ocorrem os diferentes tipos de dano abordados nos subcapítulos precedentes.

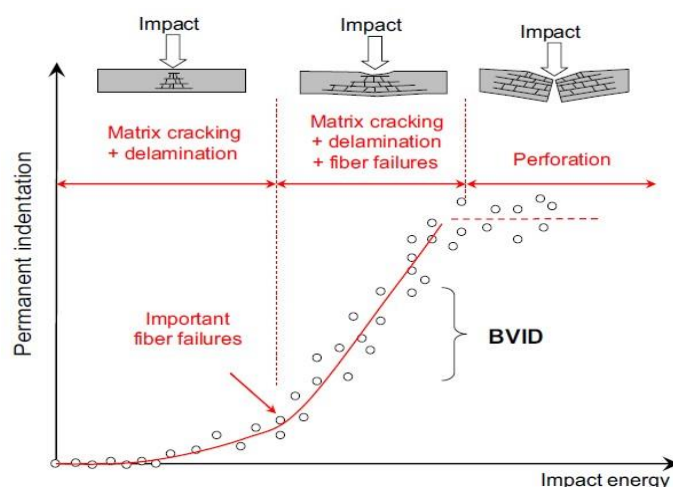


Figura 16 - Deformação permanente vs energia de impacto²⁶.

A primeira parte lida com um impacto de baixa energia. Nesta parte os danos de impacto consistem em pequenas fissuras na matriz e fenómenos de delaminação. Durante a descarga (ressalto do impactor), as fissuras da matriz e da delaminação permanecem abertas, provocando uma pequena deformação permanente. O fecho dessas fissuras é bloqueado pelos detritos da fibra e da resina gerados durante o impacto²⁶.

Quando se aumenta a energia de impacto ocorre quebra de fibras, principalmente as situadas sob o impactor, conduzindo desta forma a um rápido aumento da deformação permanente. A quebra das fibras deve-se a uma carga de compressão provocada pelo impactor e a uma carga de tração gerada na parte inferior da placa. As principais quebras de fibra ocorrem normalmente entre a meia espessura e o lado que não sofre impacto. Estas quebras devem-se às

forças de tração (e também de corte) geradas nessa zona, tornando possível destacar um cone altamente danificado na zona do impacto. É nesta zona que o BVID (barely visible impact damage) é normalmente atingido. A ocorrência destas quebras de fibra tem um efeito prejudicial sobre a resistência residual da estrutura após o impacto, mas ao mesmo tempo cria uma grande deformação permanente e permite detetar os danos provocados. Assim, para melhorar a tolerância ao dano por impacto de uma estrutura compósita é necessário, por um lado, impedir as quebras de fibra para evitar a redução excessiva da resistência residual após o impacto e, por outro lado, promover as quebras de fibra para melhorar a deteção destes danos. Esta é a complexidade deste estudo. É nesta parte que encontramos os casos mais críticos, que são os que produzem uma deformação permanente ligeiramente inferior ao BVID e, por isso, não são detetáveis por inspeção visual²⁶.

A última parte da curva lida com o fenómeno de perfuração após um impacto de elevada energia. Esta parte é paradoxalmente menos perigosa do que a anterior, isto porque o dano é facilmente detetável²⁶.

2.6.3 Tolerância ao dano

Uma vez que o objetivo desta dissertação é perceber como se pode melhorar a tolerância ao dano de um compósito, torna-se de fulcral importância entender em que consiste, exatamente, a tolerância ao dano de um material. A tolerância ao dano define a capacidade de um material, com um determinado nível de dano ou defeito na sua estrutura, de continuar a desempenhar as suas funções operacionais. Por outras palavras, a tolerância ao dano é, em última análise, uma estrutura danificada ter resistência e rigidez residual adequada para continuar em serviço até que o dano possa ser detetado e reparado⁴. Existem três aspetos essenciais que devem ser tidos em conta no que respeita à tolerância ao dano de um determinado projeto, são eles: a aceitação que o dano ocorrerá; que um sistema de inspeção adequada está disponível para detetar o dano e que a resistência necessária é mantida na estrutura danificada²².

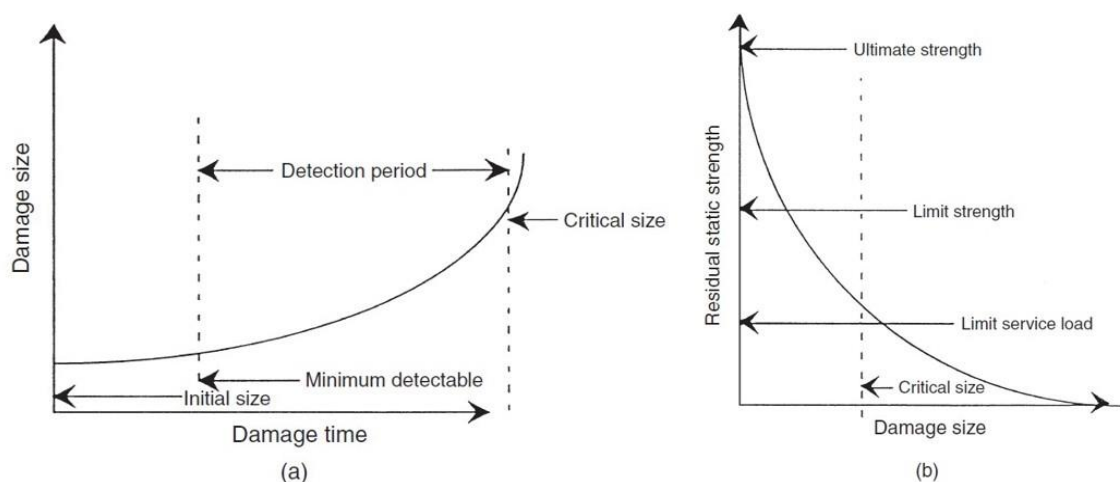


Figura 17 - Tolerância ao dano²².

Os elementos-chave do conceito de tolerância ao dano estão representados graficamente na **Figura 17**, que ilustra as características principais dos requisitos de tolerância ao dano. Como se pode ver na **Figura 17 (a)**, o período de tempo associado ao crescimento do dano, desde o início até ao comprimento crítico, representa o período de deteção de dano. A **Figura 17 (b)** representa a resistência residual disponível num componente estrutural na presença de dano durante o tempo de serviço. O gráfico expressa os limites de crescimento de dano para que a resistência residual não baixe para valores inaceitáveis²².

Página intencionalmente deixada em branco.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 PRODUÇÃO DOS LAMINADOS

A primeira parte do procedimento experimental consistiu na produção de vários laminados em material compósito com diferentes empilhamentos relativamente à posição do(s) filme(s) de aglomerado de cortiça. Fez-se variar o número e a posição relativa dos filmes de cortiça utilizados entre camadas do laminado com fibra de vidro, logo, alterou-se a sequência de empilhamento. O intuito foi ter o maior número de configurações possíveis para, depois de testadas, perceber se o uso da cortiça melhora ou não a tolerância ao dano após o impacto. Procurou-se, também, perceber qual a configuração mais vantajosa e quais os custos em decréscimo de outras propriedades (por exemplo, a rigidez), procurando simultaneamente quantificar estes aspetos e tentando correlacionar as propriedades com o aumento da contribuição de cortiça e com o local de atuação.

Decidiu-se então produzir oito placas com configurações diferentes e com aproximadamente 300x300 mm² de área. Estas oito configurações, que serão pormenorizadas mais abaixo, foram determinadas em função do maior número de casos possíveis essenciais que se poderiam testar no período de tempo estipulado para a execução desta experiência. No fabrico das placas foi utilizado tecido biaxial de fibra de vidro ($\pm 45^\circ$) com uma gramagem de 300 g/m² e cortiça, fornecida pela Amorim Cork Composites®, com 0.5 mm de espessura (nominal).

As especificações das placas são apresentadas na **Tabela 1**. Para designar cada uma delas numeraram-se as quatro camadas de fibra de vidro de 1 a 4, de cima para baixo. Ou seja, a camada 1 é a camada mais superior e a 4 a mais inferior (a que ficou junto ao molde). A designação de cada placa foi feita em função da posição da cortiça. Por exemplo, a placa 2C3 significa que a placa tem um único filme de cortiça e que este está posicionado entre a camada 2 e 3 de fibra de vidro. Entenda-se esta designação como uma simplificação da designação 12C34. Quanto à configuração normalizada, com a orientação de cada uma das

camadas, presente na **Tabela 1**, esta é ordenada de baixo para cima. Deve referir-se ainda que a placa 1C2 é equivalente da 3C4 e a placa C2C é equivalente da C3C. Têm designações distintas para pôr em evidência o facto de a cortiça estar mais próxima da superfície com melhor acabamento, ou seja da camada 4, que é a que ficou junto ao molde (3C4 e C3C), ou mais próxima da superfície com pior acabamento, ou seja a camada 1 (1C2 e C2C).

Tabela 1 - Especificações das placas.

Placa	Nº de filmes de cortiça	Configuração
C0	0	$[(+/-45) / (+/-45)]_s$
1C2	1	$[(+/-45) / (+/-45) / (-/+45) / \text{cortiça} / (-/+45)]$
3C4	1	$[(+/-45) / \text{cortiça} / (+/-45) / (-/+45) / (-/+45)]$
2C3	1	$[(+/-45) / (+/-45) / \text{cortiça} / (-/+45) / (-/+45)]$
C2C	2	$[(+/-45) / (+/-45) / \text{cortiça} / (-/+45) / \text{cortiça} / (-/+45)]$
C3C	2	$[(+/-45) / \text{cortiça} / (+/-45) / \text{cortiça} / (-/+45) / (-/+45)]$
C23C	2	$[(+/-45) / \text{cortiça} / (+/-45)]_s$
C2C3C	3	$[(+/-45) / \text{cortiça} / (+/-45) / \text{cortiça} / (-/+45) / \text{cortiça} / (-/+45)]$

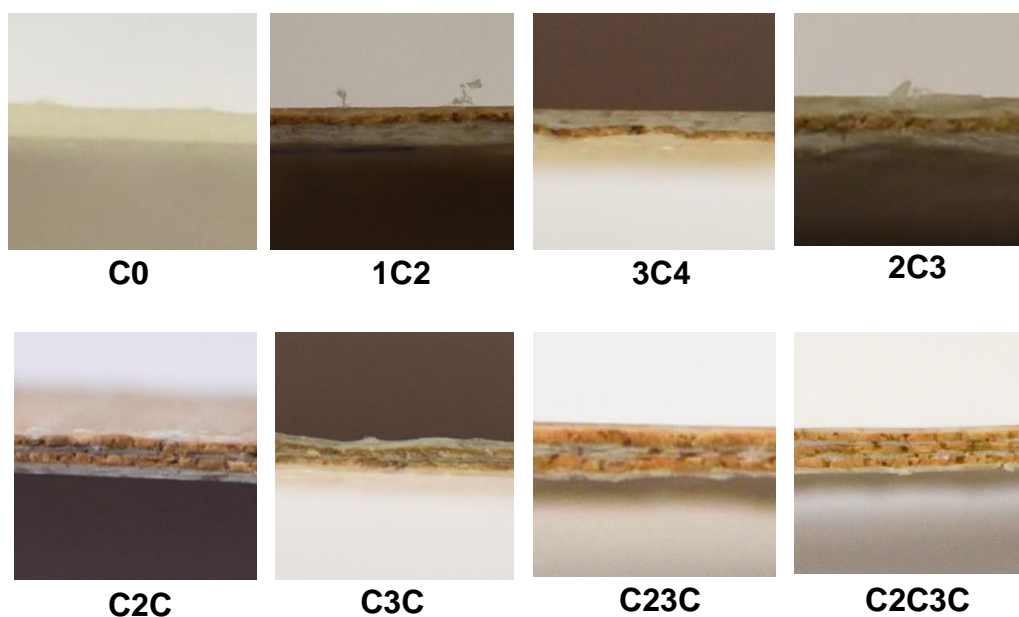


Figura 18 - Imagens reais das oito placas produzidas.

3.1.1 Preparação dos filmes de cortiça

Foram cortados vários filmes de cortiça (X300 E05A) com as dimensões ligeiramente superiores às pretendidas para a placa e foram depois inseridos numa estufa a uma temperatura de 60 °C durante 24 horas com o objetivo de reduzir a humidade para melhorar a impregnação da resina. Até à data da sua utilização no fabrico das placas os filmes foram mantidos num saco plástico selado, para reduzir ao máximo o contacto com impurezas, partículas soltas e humidade.

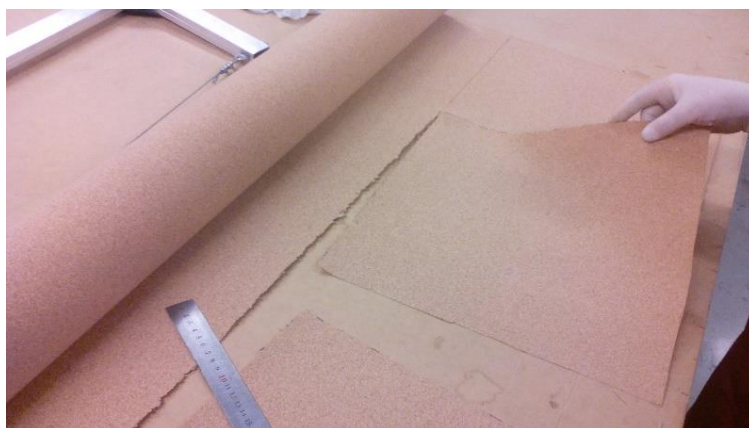


Figura 19 - Corte de filmes de cortiça.

3.1.2 Preparação da chapa-molde

Para permitir uma fácil desmoldação de cada uma das placas laminadas foi necessário uma preparação prévia da chapa-molde. Esta preparação consistiu em fazer uma limpeza da chapa com álcool e acetona com a ajuda de panos e raspadores para retirar restos de resina endurecida da moldação anterior. De seguida colocou-se fita-cola de papel a toda a volta da chapa-molde para que, depois de retirada, houvesse uma área sem cera onde se pudesse colar o saco de vácuo. Depois aplicou-se cera sobre a chapa, deixou-se atuar durante cinco minutos e, por fim, efetuou-se o polimento, removendo o excesso de cera com um pano limpo. Este processo foi repetido mais duas vezes.



Figura 20 - Aplicação de cera na chapa-molde.

3.1.3 Preparação da resina

A resina de epóxico utilizada foi a Biresin® CR92 e o endurecedor foi o Biresin® CH92-4, produzidos pela Sika®. Após a pesagem da fibra de vidro a ser utilizada em cada placa procedeu-se à preparação da resina de epóxico que foi aplicada numa razão de 7/3. Por exemplo, se a fibra a utilizar numa placa pesasse 150g (a massa de cortiça foi desprezada) seriam aplicados 350g de uma mistura de resina e endurecedor. A razão da mistura resina/endurecedor indicada pelo fabricante é 100/28. Assim, em 350g de mistura de resina e endurecedor, 76,5g seriam de endurecedor. A mistura foi depois homogeneizada com a ajuda de uma vareta.



Figura 21 - Homogeneização da mistura resina/endurecedor.

3.1.4 Processamento dos laminados

Após a preparação das camadas a aplicar, da chapa-molde e da resina procedeu-se à produção das placas laminadas pelo processo de moldação manual com saco de vácuo. Usar-se-á como exemplo a placa com mais camadas C2C3C cuja sequência de empilhamento é [(+/-45) / cortiça / (+/-45) / cortiça / (-/+45) / cortiça / (-/+45)].

Este processo pode ser descrito pelos seguintes passos:

1. Aplicou-se na chapa-molde uma camada da mistura resina/endurecedor, que será designada, daqui em diante, apenas como resina, com uma área ligeiramente maior do que a da placa laminada para garantir que toda a placa seria impregnada inferiormente. A quantidade de resina aplicada nesta primeira camada foi maior do que nas restantes para que a superfície inferior apresentasse um bom acabamento, estivesse bem impregnada e permitisse uma boa desmoldação (ver **Figura 22**).

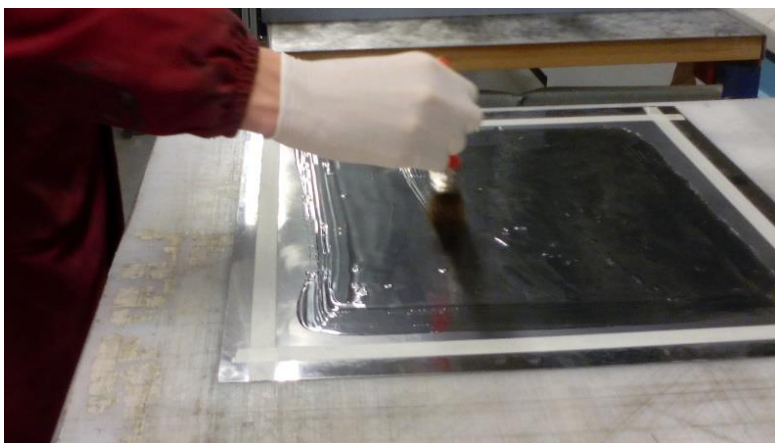


Figura 22 - Aplicação da primeira camada de resina.

2. Aplicou-se a primeira camada de fibra de vidro e, de seguida, pressionou-se toda a área da fibra com a trincha para que a resina em excesso da camada inferior impregnasse o máximo possível a fibra. Por fim, aplicou-se mais uma camada de resina para garantir uma boa impregnação em toda a área.

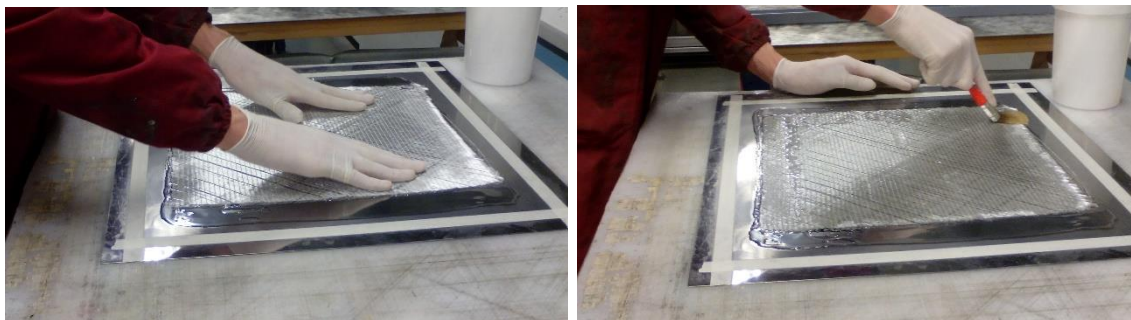


Figura 23 - Aplicação da fibra de vidro (esquerda) e impregnação da fibra por pressão (direita).

3. Procedeu-se à colocação da primeira camada de reforço interlaminar, neste caso um filme de cortiça, cujo processo foi idêntico ao referido no ponto anterior. No entanto, este exigiu especial atenção, porque apesar de o filme de cortiça possuir um ligante, que neste caso é o poliuretano, com boa compatibilidade com a resina de epóxico, a resina que atravessa os seus poros é essencial para a união às camadas adjacentes através de um mecanismo de ancoragem. É, por isso, essencial garantir uma boa impregnação destes filmes.

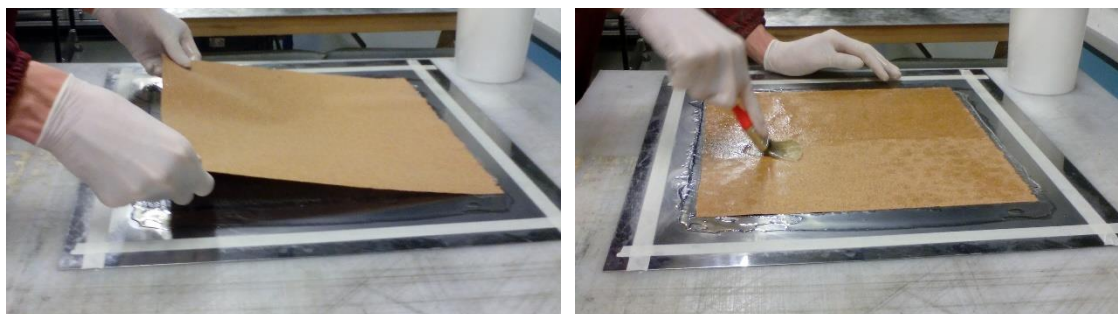


Figura 24 - Aplicação do filme de cortiça (esquerda) e impregnação do filme por pressão (direita).

4. Repetiu-se o procedimento descrito nos dois pontos anteriores respeitando a sequência de empilhamento de cada uma das placas. Este procedimento resumiu-se em três passos: aplicação da fibra de vidro ou filme de cortiça; impregnação dos mesmos com a resina da camada inferior através de pressão e, por fim, adição de uma nova camada de resina. Este processo

teve de ser rápido uma vez que a resina começa a cura entre 15 a 20 minutos após a junção do endurecedor.

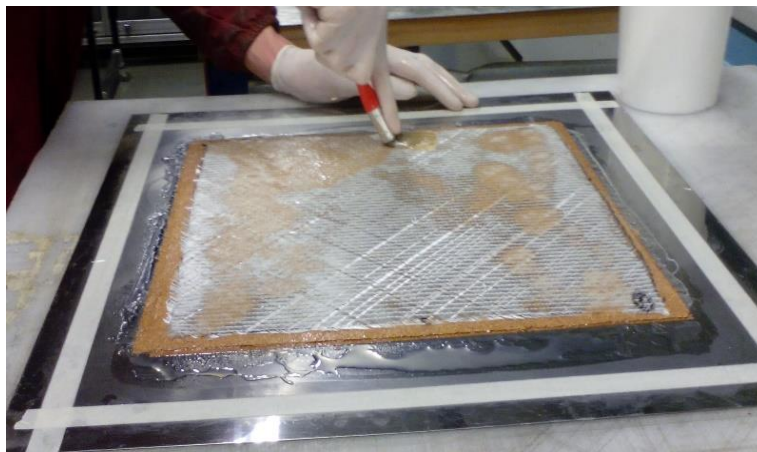


Figura 25 - Impregnação da última camada da placa C2C3C.

5. Depois de bem impregnadas todas as camadas foi, então, aplicada uma camada de tecido *peel ply*, para facilitar a desmoldação superior da placa e absorver o excesso de resina. Por fim, foi adicionada uma camada de *breather*, um tecido esponjoso que promove uma boa distribuição do vácuo ao longo de toda a área da placa.

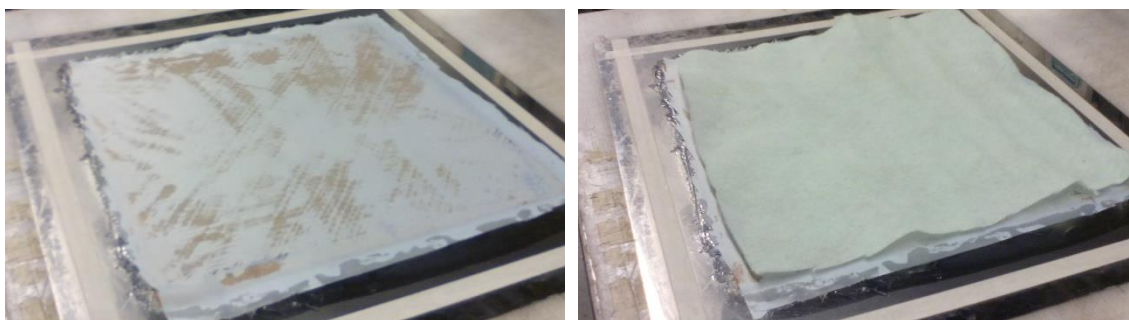


Figura 26 - Aplicação do *peel ply* (esquerda), e aplicação do *breather* (direita).

6. Retirou-se a fita-cola de papel, colou-se o saco de vácuo e aplicou-se o vácuo durante cerca de 12 horas. Findo este período retirou-se o saco de vácuo e procedeu-se à desmoldação da placa.



Figura 27 - Colagem do saco de vácuo (esquerda), e desmoldação da placa (direita).

7. Após a desmoldação, as placas foram introduzidas numa estufa a uma temperatura de 80 °C durante 8 horas para o processo de pós-cura. Depois de prontas foram cortadas em função das dimensões normalizadas de provetes para diferentes tipos de ensaios e de acordo com um esquema previamente definido. Retirou-se o excesso de água, proveniente da máquina de corte, com ar comprimido. Por fim, identificou-se devidamente cada um dos provetes antes de serem introduzidos na estufa a uma temperatura de 60 °C durante 8 horas para remoção de resíduos de água resultantes do processo de corte.



Figura 28 - Corte da placa (esquerda), e placa com os primeiros cortes para provetes (direita).

De notar que, durante todo este processo, duas placas tiveram de ser repetidas. A C0, correspondente ao laminado de referência, devido a um pequeno furo no saco de vácuo que levou a um enfraquecimento do efeito de vácuo e consequentemente a uma espessura anormal da placa, uma vez que não foi retirada toda a resina em excesso. E a placa C23C por má impregnação da

camada mais inferior da mesma. Neste caso, porém, ambas as placas foram utilizadas, embora uma delas com menos provetes associados, por possuir menor área útil. O facto de existirem provetes provenientes de duas placas idênticas permitirá efetuar uma avaliação da repetibilidade do processo de fabrico.

3.2 PREPARAÇÃO DOS PROVETES

Os provetes foram cortados com base nas dimensões normalizadas. No entanto, para alguns ensaios, as suas quantidades não são as normalizadas por limitações de área da placa que foram estipuladas pelo equilíbrio entre ensaios, tempo e custo inerentes à sua produção. Os provetes para os ensaios TAI (tração após impacto) não seguiram nenhuma norma, por se tratar de um ensaio cujas fundamentações bibliográficas estão ainda muito pouco aprofundadas. As quantidades, dimensões e normas utilizadas para a produção dos provetes de cada ensaio podem ser consultadas na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Especificações dos provetes de cada ensaio.

Tipo	Quantidade	Dimensões (mm)	Norma
Flexão	5	(30xh*)x15 *espessura	ISO 14125
Tração	5	250x25	ISO 527-4
Impacto	6	60x60	ASTM D 5628-96
TAI	4	150x25	-

Página intencionalmente deixada em branco.

4 ENSAIOS, RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 ENSAIOS DE FLEXÃO

Os ensaios de flexão foram baseados no método A (flexão em três pontos) da norma ISO 14125, e foram realizados numa máquina universal de ensaios INSTRON, modelo 4208, existente no Laboratório de Ensaaios Mecânicos do INEGI. O apoio superior tinha 10 mm de diâmetro e os apoios inferiores 4 mm. A distância entre os apoios inferiores, sobre os quais foi colocado o provete, foi de $20xh$, onde h é a espessura do provete em mm. A velocidade de avanço da cabeça também variou em função da espessura do provete segundo a equação (1), onde L é a distância entre os apoios inferiores e h é a espessura do provete, ambas igualmente expressas em mm. De referir que, para manter a taxa de deformação o mais próximo possível de 0.01 (1% por minuto), não se arredondou o valor calculado para o valor mais próximo contido na tabela da norma de ensaio. Os valores das diferentes velocidades utilizadas podem ser consultados na **Tabela 3**. A célula de carga utilizada foi de 1 KN.

$$v = \frac{0,01L^2}{6h} \text{ (mm/min)} \quad (1)$$

Estes ensaios permitem determinar as propriedades de flexão de materiais compósitos em formas retangulares cortados a partir de placas fabricadas. Foi utilizado o método A da norma ISO 14125, como já referido acima, que consiste num provete simplesmente apoiado em dois pontos e carregado no ponto central, como se pode ver na **Figura 29**. No sistema de controlo da máquina inserem-se os dados referentes a cada provete, como por exemplo a velocidade pretendida para o ensaio. Depois de efetuado esse passo, no computador, são adquiridos os resultados da força aplicada e do deslocamento. A força é medida pela célula de carga da máquina e o deslocamento pelo sensor de posição.

Foram ensaiados cinco provetes para cada placa. No entanto, numa tentativa de reduzir o efeito da superfície dos provetes nos resultados (a superfície associada à chapa-molde é lisa e a associada ao *peel ply* é rugosa), os provetes 1,3 e 5 de

cada placa foram ensaiados com a superfície rugosa para cima, e os provetes 2 e 4 com a superfície rugosa para baixo.

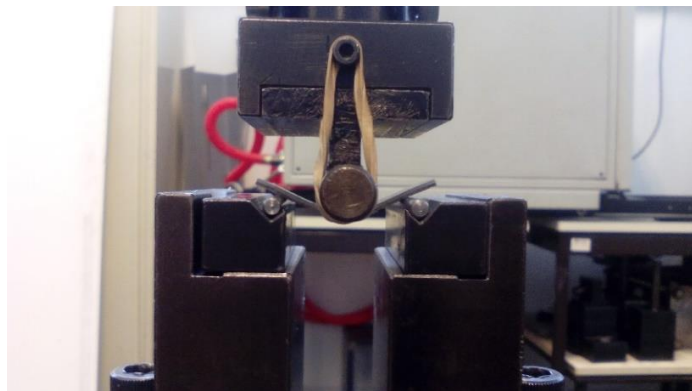


Figura 29 - Ensaio de flexão.

Depois de registados os valores dos cinco provetes procedeu-se ao cálculo da tensão de flexão através da equação (2), onde F é a força aplicada, em newtons, L é a distância entre apoios, e b e h são a largura e espessura do provete, respetivamente, em mm. Calculou-se também a deformação através da equação (3), onde s é a flecha, e ainda o módulo de elasticidade em flexão através do declive da curva tensão-deformação entre 0.05 e 0.25% de deformação.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \times 100 \text{ (\%)} \quad (3)$$

As medições efetuadas, valores registados e resultados obtidos nos ensaios de flexão efetuados nas oito placas são apresentados no subcapítulo seguinte.

Tabela 3 - Velocidade do ensaio de flexão para cada placa.

Placa	Velocidade do ensaio (mm/min)
C0	0.8
1C2, 3C4 e 2C3	1.0
C2C, C3C e C23C	1.3
C2C3C	1.6

4.1.1 Resultados obtidos nos ensaios de flexão

4.1.1.1 Resultados da placa C0

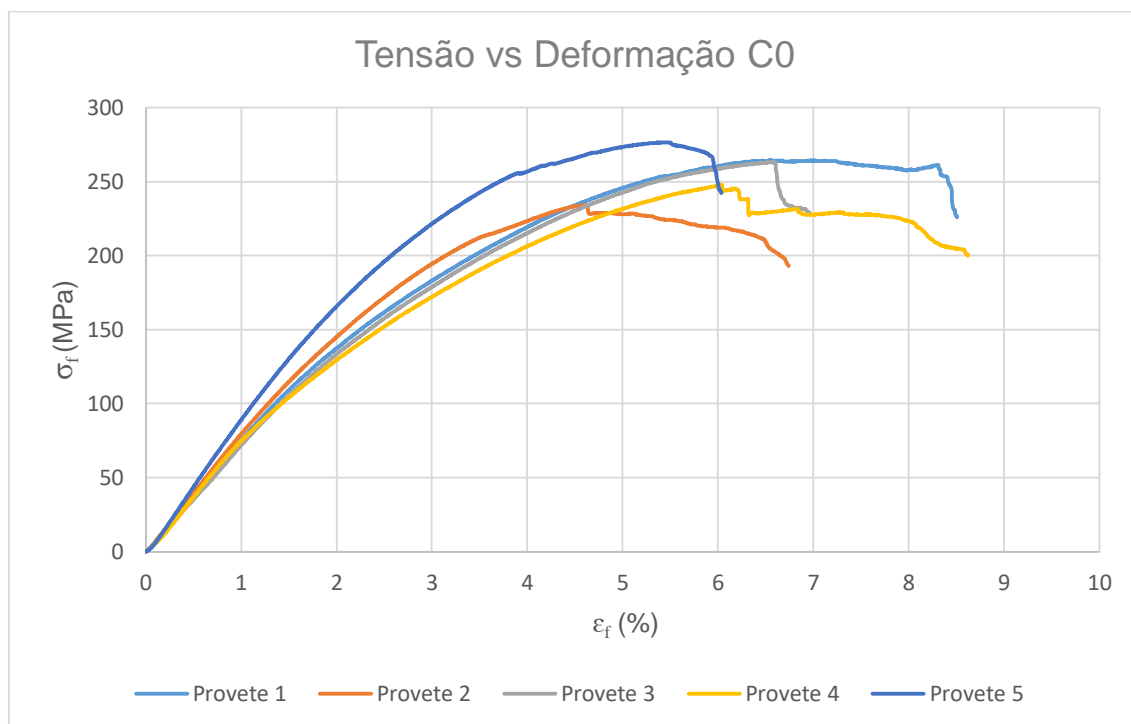


Figura 30 - Curva Tensão vs Deformação (C0).

Verificou-se neste ensaio que os resultados foram bastante próximos e que os valores mínimos de deformação registaram-se para as placas mais espessas.

Tabela 4 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa C0.

Proвете L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_f (MPa)	Deformação ϵ_f (%)	Módulo E_f (GPa)
1 L	14.01	1.17	264.47	7.02	7.11
2 L	15.02	1.20	234.00	4.61	8.15
3 L	14.79	1.19	263.48	6.58	7.17
4 T	14.88	1.19	247.71	6.05	6.85
5 T	14.99	1.22	276.54	5.48	8.99
Valor médio	14.74	1.19	257.24	5.95	7.65
Desvio padrão	0.42	0.02	16.54	0.94	0.89

4.1.1.2 Resultados da placa 1C2

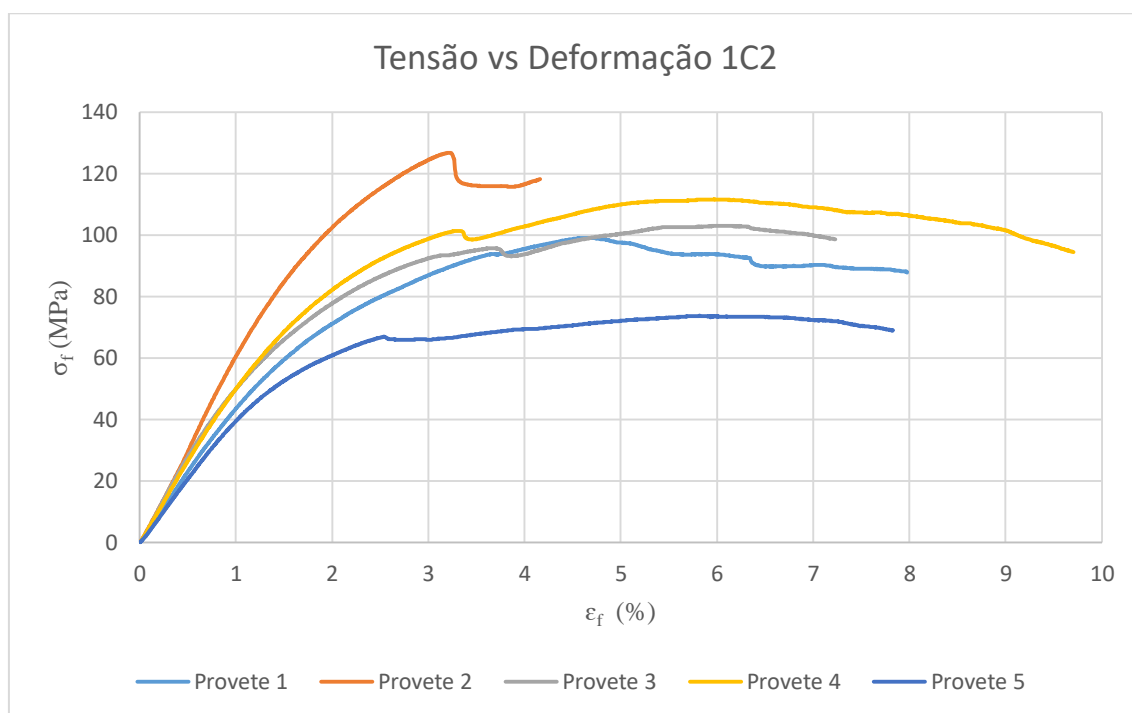


Figura 31 - Curva Tensão vs Deformação (1C2).

Para esta placa verificou-se que os provetes 2 e 5 tiveram resultados bastante diferentes da média, o que não se deveu à orientação de corte do provete, uma vez que tinham orientações diferentes. De notar ainda que a maioria dos provetes apresentou uma ligeira quebra entre os 3 e 4% de deformação.

Tabela 5 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa 1C2.

Provete L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_f (MPa)	Deformação ε_f (%)	Módulo E_f (GPa)
1 L	15.19	1.59	99.15	4.68	4.72
2 L	15.19	1.60	126.76	3.23	5.84
3 L	15.17	1.54	103.11	6.05	5.93
4 T	14.99	1.66	111.68	5.97	5.39
5 T	15.23	1.60	73.77	5.82	4.26
Valor médio	15.15	1.60	102.89	5.15	5.23
Desvio padrão	0.09	0.04	19.42	1.21	0.72

4.1.1.3 Resultados da placa 3C4

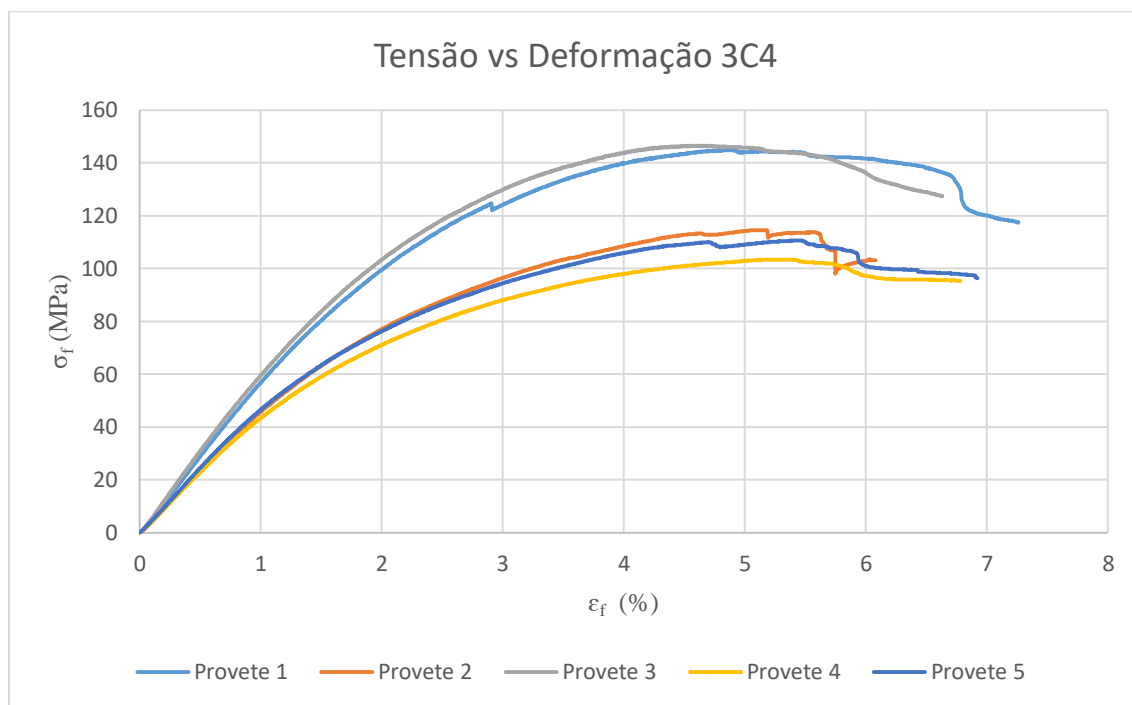


Figura 32 - Curva Tensão vs Deformação (3C4).

Como se pode ver na **Figura 32** os provetes 3 e 5 apresentaram um comportamento semelhante entre si e distinto dos restantes, o que também não se deveu à orientação de corte pois foi diferente entre si. De notar também que todos apresentaram deformações máximas bastante semelhantes.

Tabela 6 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa 3C4.

Proвете L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_f (MPa)	Deformação ε_f (%)	Módulo E_f (GPa)
1 L	15.20	1.58	144.96	4.87	5.87
2 L	15.20	1.61	114.56	5.08	5.01
3 L	15.00	1.65	146.56	4.67	6.39
4 T	15.15	1.61	103.49	5.41	4.70
5 T	15.02	1.65	110.70	5.45	4.88
Valor médio	15.11	1.62	124.05	5.10	5.37
Desvio padrão	0.10	0.03	20.22	0.34	0.72

4.1.1.4 Resultados da placa 2C3

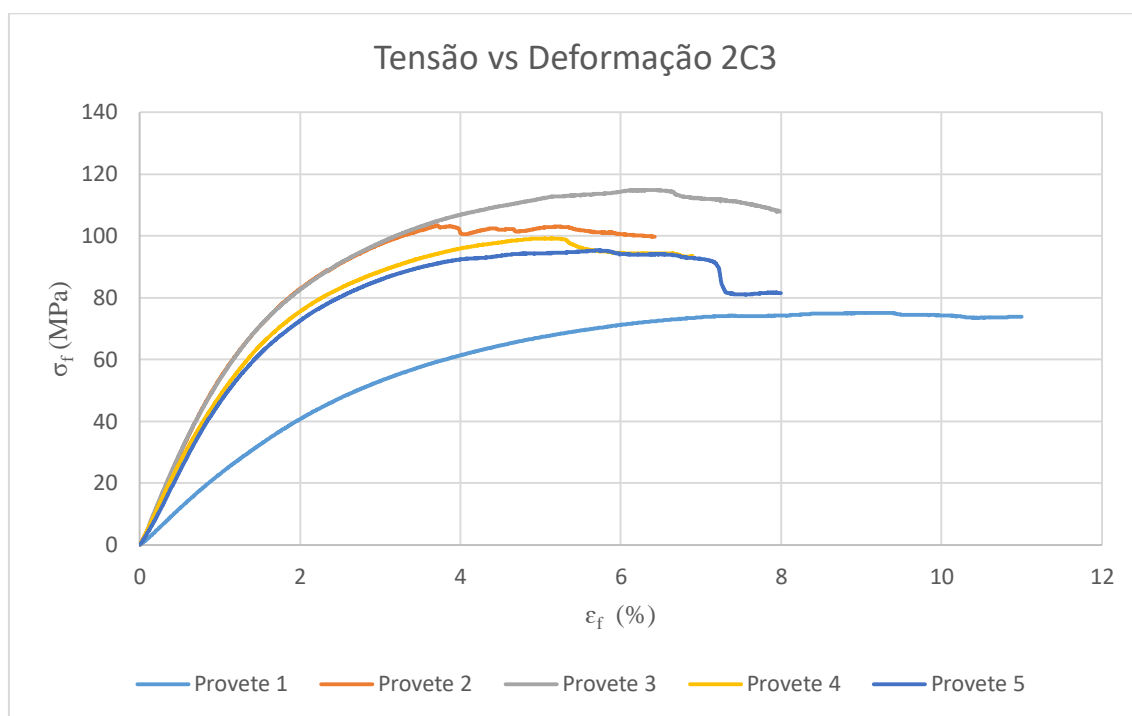


Figura 33 - Curva Tensão vs Deformação (2C3).

Para a placa 2C3 o provete 1 apresentou propriedades mecânicas bastante inferiores dos restantes quando solicitado à flexão, devendo-se certamente a uma má impregnação pontual da placa. Contudo, os valores do mesmo foram considerados por o comportamento da curva não ser completamente distinto.

Tabela 7 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa 2C3.

Proвете L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_f (MPa)	Deformação ϵ_f (%)	Módulo E_f (GPa)
1 L	15.18	1.53	75.09	9.26	2.37
2 L	15.15	1.55	103.41	3.72	5.26
3 L	15.16	1.63	114.91	6.43	6.20
4 T	15.19	1.63	99.23	5.16	5.58
5 T	15.17	1.65	95.34	5.70	4.53
Valor médio	15.17	1.60	97.60	6.05	4.79
Desvio padrão	0.02	0.05	14.56	2.05	1.48

4.1.1.5 Resultados da placa C2C

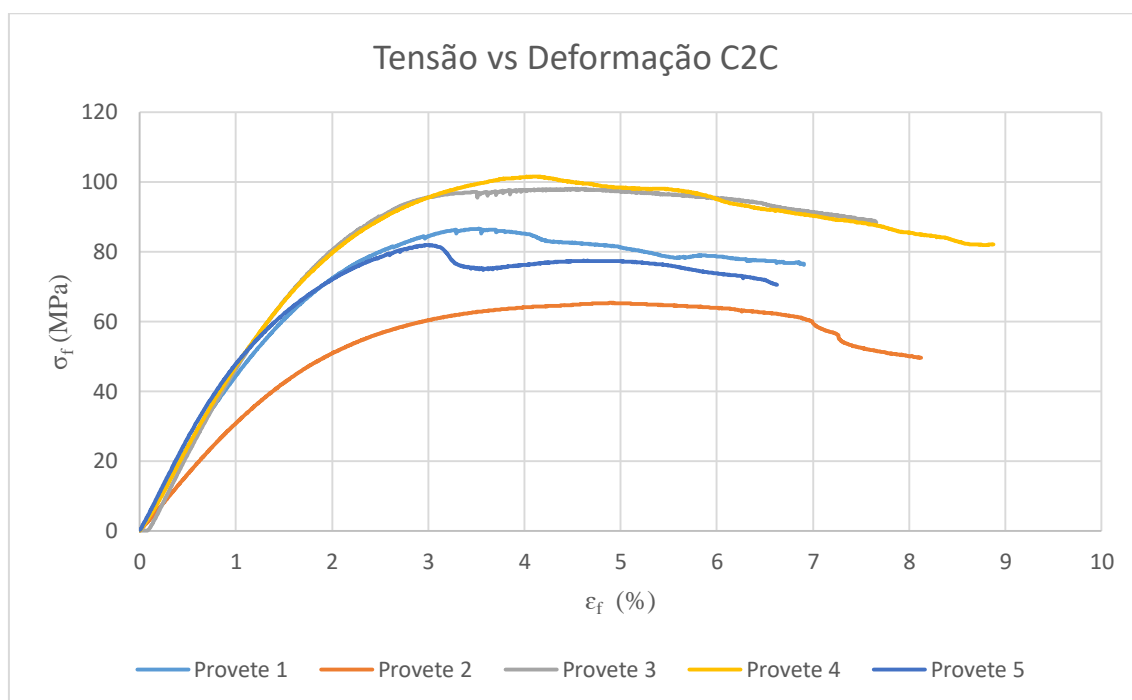


Figura 34 - Curva Tensão vs Deformação (C2C).

Verificou-se para a placa C2C que os resultados à flexão foram bastante dispersos, destacando-se três níveis distintos de tensão máxima atingida, não havendo, no entanto, qualquer correlação com a orientação de corte.

Tabela 8 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa C2C.

Proвете L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_f (MPa)	Deformação ε_f (%)	Módulo E_f (GPa)
1 L	15.06	2.09	86.60	3.52	5.10
2 L	14.95	1.97	65.34	4.90	3.26
3 L	15.08	2.01	97.97	4.62	4.54
4 T	14.98	2.09	101.59	4.12	4.57
5 T	15.11	1.98	81.90	3.00	5.45
Valor médio	15.04	2.03	86.68	4.03	4.58
Desvio padrão	0.07	0.06	14.39	0.78	0.84

4.1.1.6 Resultados da placa C3C

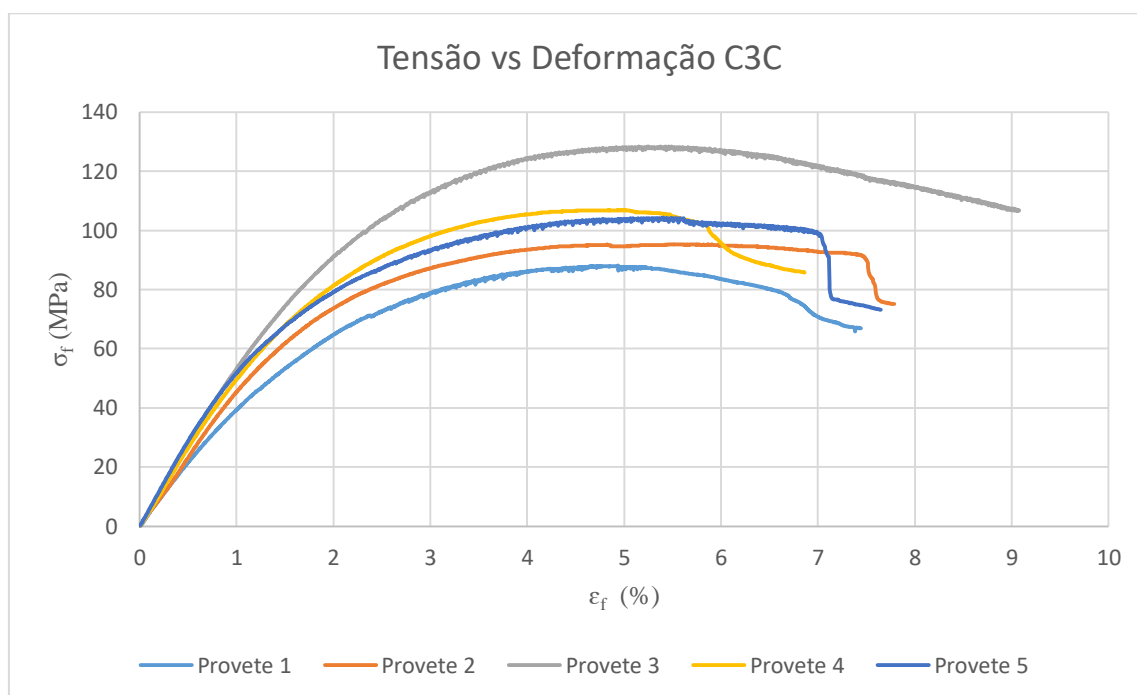


Figura 35 - Curva Tensão vs Deformação (C3C).

O comportamento dos provetes da placa C3C sujeitos a um esforço de flexão foi bastante semelhante, apresentando deformações máximas e módulos de elasticidade bastante idênticos, não variando muito em torno dos 5% e dos 5 GPa respectivamente.

Tabela 9 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa C3C.

Proвете L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_f (MPa)	Deformação ϵ_f (%)	Módulo E_f (GPa)
1 L	15.00	1.97	88.03	4.93	4.44
2 L	15.11	2.06	95.34	5.51	4.39
3 L	15.10	2.16	128.42	5.42	5.85
4 T	15.04	1.99	106.88	5.01	5.29
5 T	14.98	2.09	104.34	5.45	5.97
Valor médio	15.05	2.05	104.60	5.26	5.19
Desvio padrão	0.06	0.08	15.27	0.27	0.75

4.1.1.7 Resultados da placa C23C

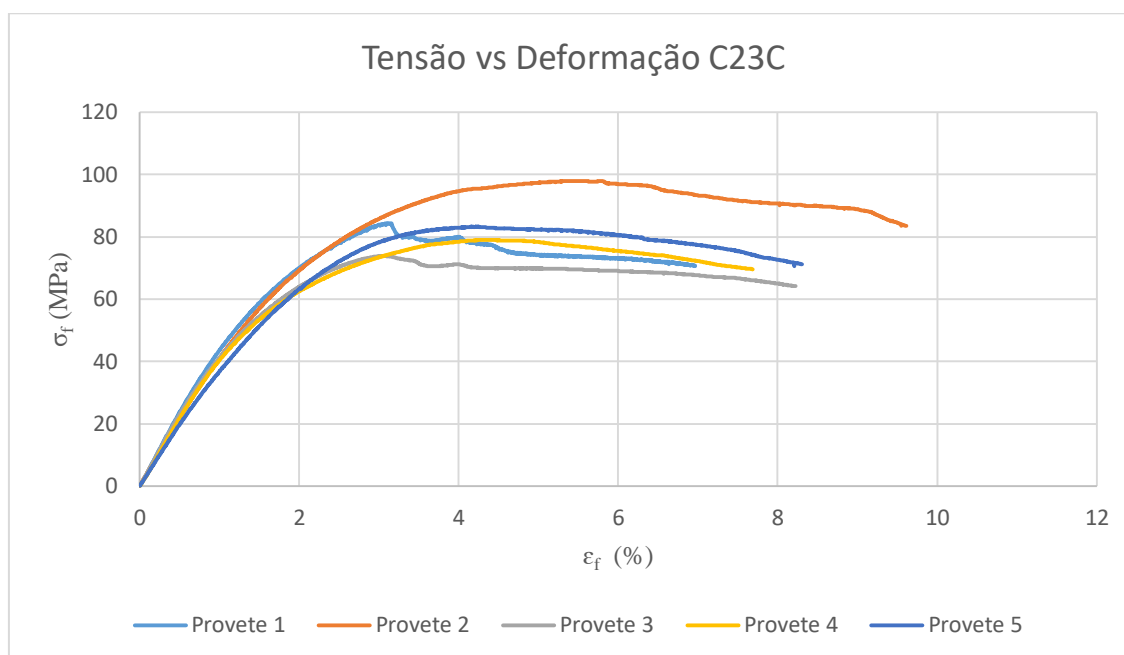


Figura 36 - Curva Tensão vs Deformação (C23C).

Numa pequena análise da **Figura 36** e da **Tabela 10** é possível verificar que o módulo de elasticidade é muito idêntico em todos os provetes e, excetuando o provete 2, o mesmo se verifica para a deformação e tensão máxima dos restantes provetes. A cedência da placa C23C ocorre em média em torno dos 80 MPa.

Tabela 10 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa C23C.

Proвете L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_f (MPa)	Deformação ϵ_f (%)	Módulo E_f (GPa)
1 L	14.84	2.07	84.35	3.10	4.85
2 L	14.43	2.11	97.96	5.52	4.47
3 L	14.75	2.06	73.90	3.04	4.74
4 T	14.98	2.09	79.06	4.36	4.45
5 T	14.78	2.08	83.27	4.24	4.03
Valor médio	14.76	2.08	83.71	4.05	4.51
Desvio padrão	0.20	0.02	8.97	1.02	0.32

4.1.1.8 Resultados da placa C2C3C

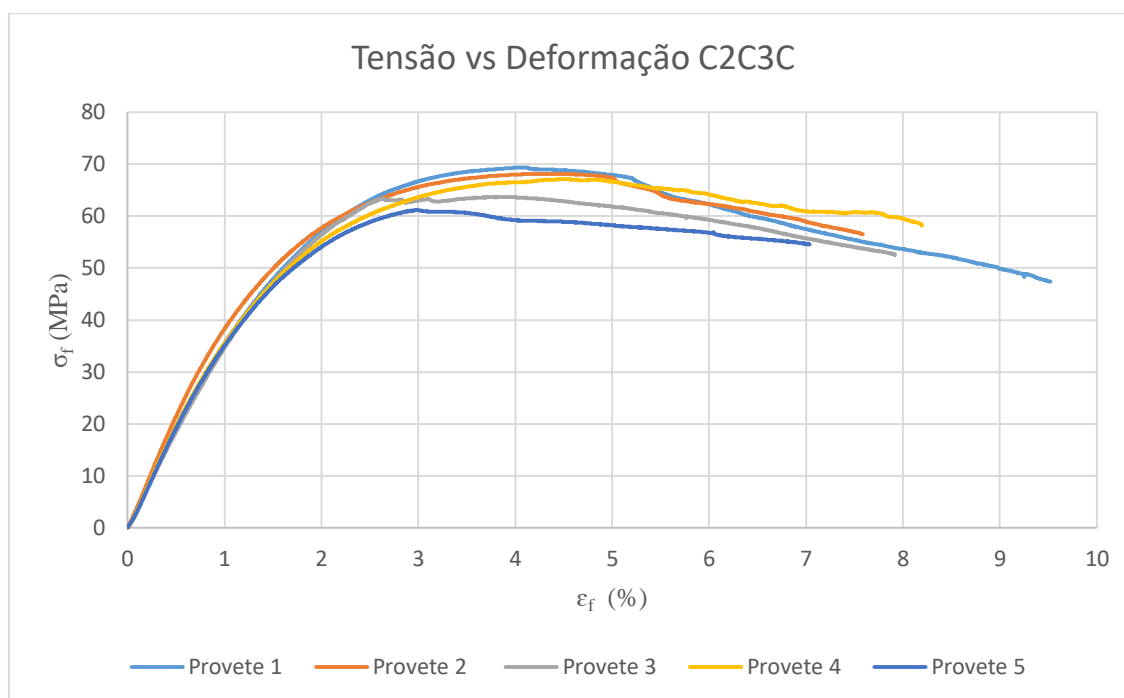


Figura 37 - Curva Tensão vs Deformação (C2C3C).

Os resultados para a placa com mais filmes de cortiça foram bastante consistentes, com deformações máximas na ordem dos 4% e com tensões máximas sempre entre os 60 e os 70 MPa. Em termos de módulo de elasticidade à flexão os valores variam muito pouco em torno dos 4 GPa.

Tabela 11 - Valores dos provetes dos ensaios de flexão da placa C2C3C.

Proвете L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_f (MPa)	Deformação ϵ_f (%)	Módulo E_f (GPa)
1 L	15.08	2.43	69.37	4.13	4.04
2 L	14.95	2.44	68.19	4.35	4.41
3 L	14.58	2.37	63.70	3.82	3.86
4 T	15.07	2.38	67.14	4.51	4.20
5 T	15.12	2.38	61.22	2.99	4.01
Valor médio	14.96	2.40	65.92	3.96	4.10
Desvio padrão	0.22	0.03	3.37	0.60	0.21

4.1.2 Análise dos resultados dos ensaios de flexão

Antes de se iniciar a análise dos resultados obtidos nos ensaios de flexão deve referir-se que os provetes 2 e 4 (ensaiados do lado da superfície lisa, a camada mais inferior que ficou junto à chapa-molde aquando da moldação) da placa 1C2 e C2C foram trocados com os provetes 2 e 4 das placas homólogas 3C4 e C3C, respetivamente. Esta troca permitiu carregar os cinco provetes do mesmo lado, teoricamente, e ainda minimizar o efeito da superfície nos resultados. Os gráficos abaixo expressos foram baseados nos valores médios e desvio padrão da tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade apresentados no subcapítulo anterior. Pretende-se desta forma condensar a informação e promover uma melhor análise comparativa das diferentes placas.

O aspeto que mais se destaca numa primeira análise da **Figura 38** é a enorme discrepância de valores de tensão máxima entre a placa sem cortiça e as restantes com cortiça. Uma diferença de valores superior a 50%.

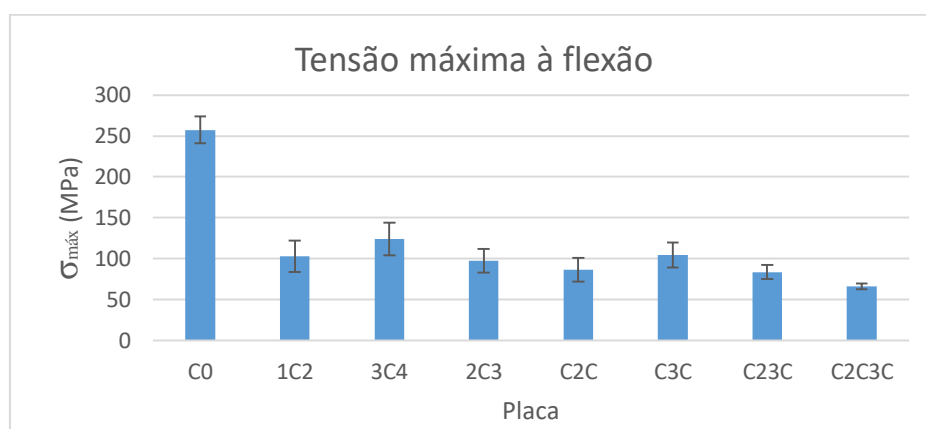


Figura 38 - Tensão máxima média à flexão.

No grupo das sete placas com cortiça também é perceptível que, em média, a tensão máxima diminui com o aumento do número de filmes de cortiça no laminado. No entanto, como é visível, a diferença de valores máximos de tensão entre as placas com dois e três filmes e as placas com um filme é quase insignificante quando comparada com a diferença entre a placa com um filme e

a placa de referência. O mesmo acontece com os valores do módulo de elasticidade, como se pode ver na **Figura 39**. Já havia sido referido no capítulo 3 que a resina que atravessa os poros do filme de cortiça é uma das principais responsáveis pela sua união às camadas adjacentes através de um mecanismo de ancoragem. Desta forma, as ligações cortiça/fibra são menos resistentes do que as ligações fibra/fibra e, portanto, mais suscetíveis a sofrerem delaminação, motivo pelo qual há uma redução significativa das propriedades mecânicas.

Através da conjugação de provetes entre as placas idênticas 1C2/3C4 e C2C/C3C, anteriormente referida, foi possível verificar que as placas que continham o(s) filme(s) de cortiça mais afastado(s) da camada onde era aplicado o carregamento apresentaram propriedades mecânicas mais elevadas do que as suas homólogas. O que aconteceu tanto na placa 3C4 em relação à 1C2 como na C3C em relação à C2C. Este facto pode ser explicado novamente pelo fenómeno de delaminação. O aparecimento da delaminação é mais suscetível quando o compósito está sujeito a forças de compressão, e mais ainda se as forças de ligação entre as camadas na região à compressão forem mais fracas do que as restantes. No caso das placas 1C2 e C2C estes dois aspetos são verificados quando comparadas com as suas homólogas. No caso da placa 1C2, por exemplo, o único filme de cortiça da placa está na região à compressão enquanto na 3C4 está na região à tração, não contribuindo tanto para a perda de resistência do laminado.

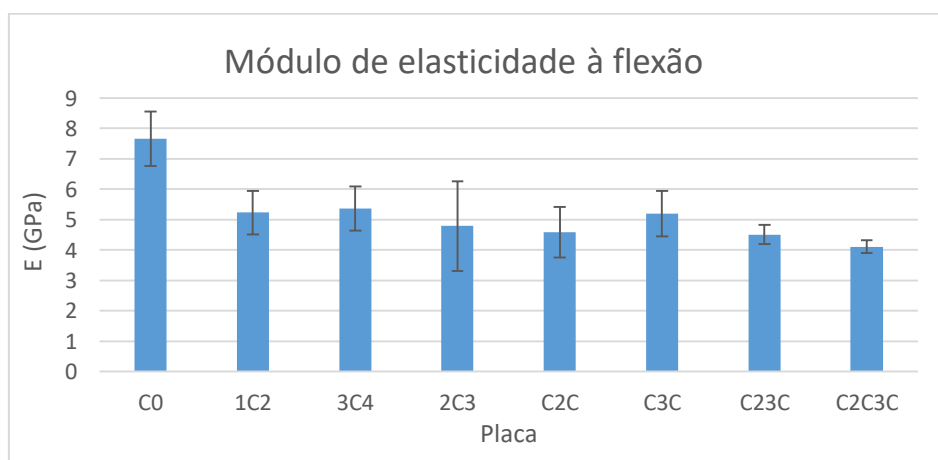


Figura 39 - Módulo de elasticidade médio à flexão.

No caso da deformação dos provetes nos ensaios de flexão, a espessura foi determinante para os resultados obtidos. De uma forma geral os valores da deformação não variam tão significativamente quando comparados com os valores das outras duas grandezas medidas neste ensaio (tensão máxima e módulo de elasticidade). Por exemplo, a diferença máximo/mínimo é de cerca de 33%, para este caso, sendo a menor diferença máximo/mínimo entre as três grandezas analisadas. Apesar do aumento do número filmes de cortiça, que é um material bastante flexível, pressupor um aumento da deformação, isso não aconteceu porque o consequente aumento da espessura funcionou como entrave à deformação e compensou o efeito da introdução no compósito de um material flexível. Pela análise da **Figura 40** pode verificar-se que as placas com maior número de filmes de cortiça, e consequentemente com maior espessura, apresentaram, em média, menor deformação.

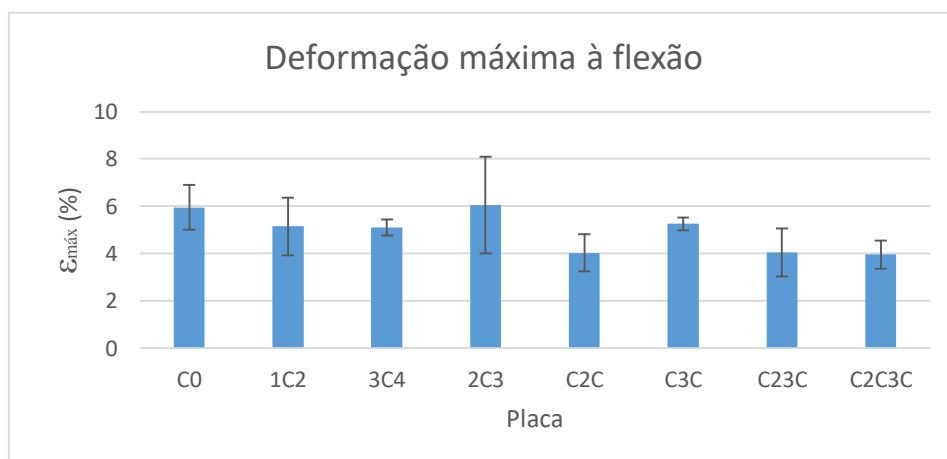


Figura 40 - Deformação máxima média à flexão.

4.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados com base nas normas ISO 527-1 e -4 e com a mesma máquina referida no subcapítulo 4.1 com os acessórios adequados para este tipo de ensaios. Utilizou-se uma velocidade de 2 mm/min e uma célula de carga de 5 KN. Para medição dos deslocamentos com precisão recorreu-se a um extensómetro INSTRON, com uma distância de referência de 50 mm e curso máximo de 5 mm (10%). Utilizaram-se provetes do tipo 2, referidos na norma acima indicada, sem furos.



Figura 41 - Ensaio de tração.

Dos cinco provetes de cada placa disponíveis para os ensaios de tração, três deles (e em alguns casos quatro) foram utilizados para determinação da tensão, deformação e módulo de elasticidade. Com os ficheiros correspondentes à aquisição de dados de força e deslocamento do extensómetro procedeu-se ao cálculo da tensão através da equação (4), onde F é a força aplicada, em newtons, e b e h são a largura e espessura do provete, respetivamente, em mm. A deformação foi calculada através da equação (5), onde L_0 é a distância entre as duas agarras do extensómetro e ΔL_0 é o incremento desta distância, igualmente em mm. O módulo de elasticidade foi calculado através do declive da curva tensão-deformação entre 0.05 e 0.25% de deformação.

$$\sigma_t = \frac{F}{bh} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_0}{L_0} \times 100 \text{ (\%)} \quad (5)$$

4.2.1 Resultados obtidos nos ensaios de tração

4.2.1.1 Resultados da placa C0

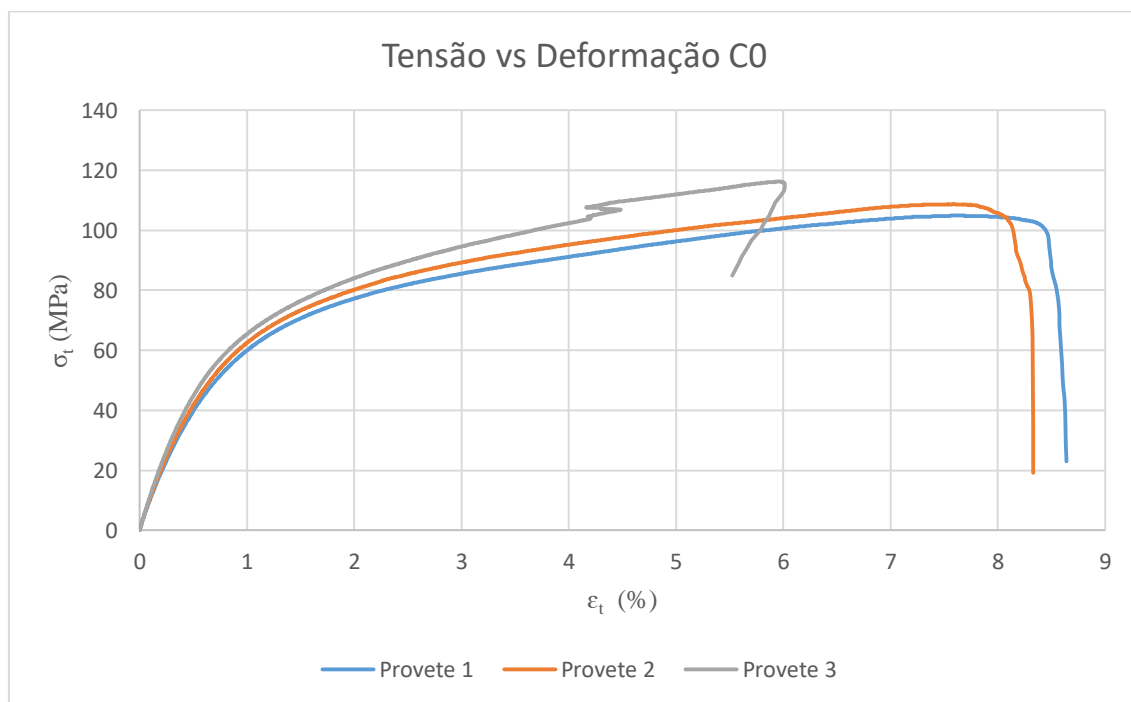


Figura 42 - Curva Tensão vs Deformação (C0).

Como se pode ver na curva do provete 3 da **Figura 42** houve um escorregamento do extensômetro durante o ensaio de tração. Nos restantes provetes, cortados longitudinalmente, os valores foram idênticos entre si.

Tabela 12 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa C0.

Proвете L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_t (MPa)	Deformação ϵ_t (%)	Módulo E_t (GPa)
1 L	25.00	1.21	104.89	7.61	8.76
2 L	24.98	1.21	108.71	7.54	9.28
3 T	25.10	1.11	116.25	5.98*	10.20
Valor médio	25.03	1.18	109.95	7.57	9.41
Desvio padrão	0.06	0.06	5.78	0.05	0.73

*Valor desprezado por escorregamento do extensômetro.

4.2.1.2 Resultados da placa 1C2

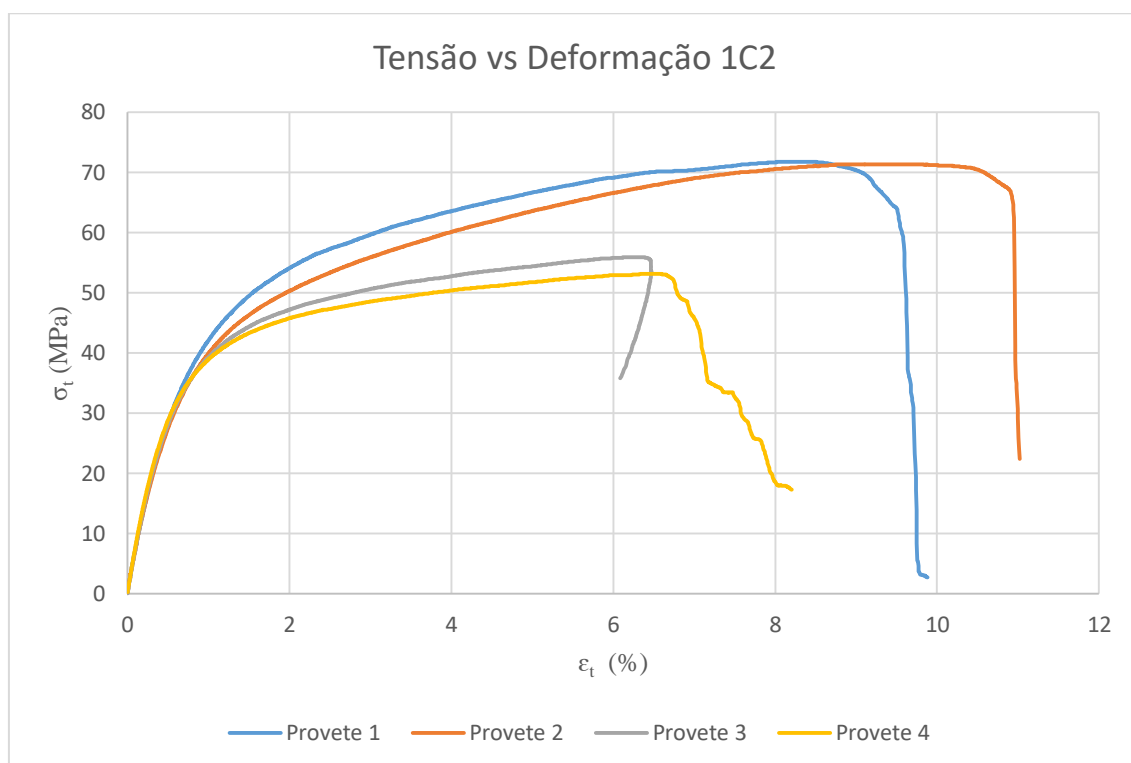


Figura 43 - Curva Tensão vs Deformação (1C2).

Para a placa 1C2 é perceptível um comportamento distinto entre o par de provetes 1 e 2 e o par 3 e 4, apresentando este último valores consideravelmente inferiores de deformação e tensão máxima. Contudo o módulo de elasticidade é bastante idêntico em todos eles, variando pouco em torno dos 6.5 GPa.

Tabela 13 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa 1C2.

Proвете L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ _t (MPa)	Deformação ε _t (%)	Módulo E _t (GPa)
1 L	25.41	1.59	71.80	8.31	6.32
2 L	24.97	1.61	71.39	9.62	6.20
3 T	25.39	1.50	55.95	6.29	6.60
4 L	24.84	1.49	53.14	6.46	6.76
Valor médio	25.15	1.55	63.07	7.67	6.47
Desvio padrão	0.29	0.06	9.91	1.59	0.26

4.2.1.3 Resultados da placa 3C4

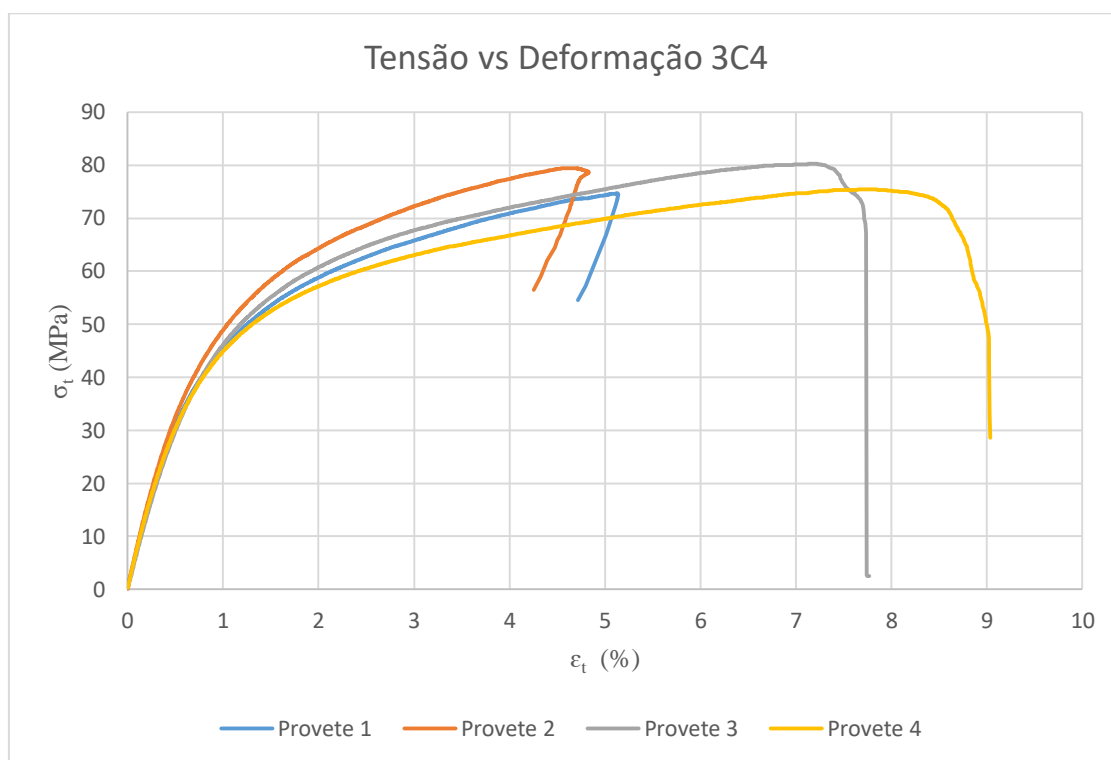


Figura 44 - Curva Tensão vs Deformação (3C4).

À semelhança da placa homóloga 1C2 também nesta é perceptível um comportamento distinto entre o par de provetes 1 e 2 e o par 3 e 4. Desta vez com o primeiro par a apresentar menor deformação máxima e maior módulo de rigidez, no entanto com tensão máxima idêntica ao segundo par de provetes.

Tabela 14 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa 3C4.

Proвете L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_t (MPa)	Deformação ϵ_t (%)	Módulo E_t (GPa)
1 L	25.05	1.60	74.72	5.13	7.07
2 L	25.05	1.58	79.48	4.67	7.31
3 T	24.50	1.70	80.28	7.22	6.59
4 L	25.02	1.64	75.47	7.77	6.85
Valor médio	24.90	1.63	77.49	6.20	6.96
Desvio padrão	0.27	0.05	2.80	1.53	0.31

4.2.1.4 Resultados da placa 2C3

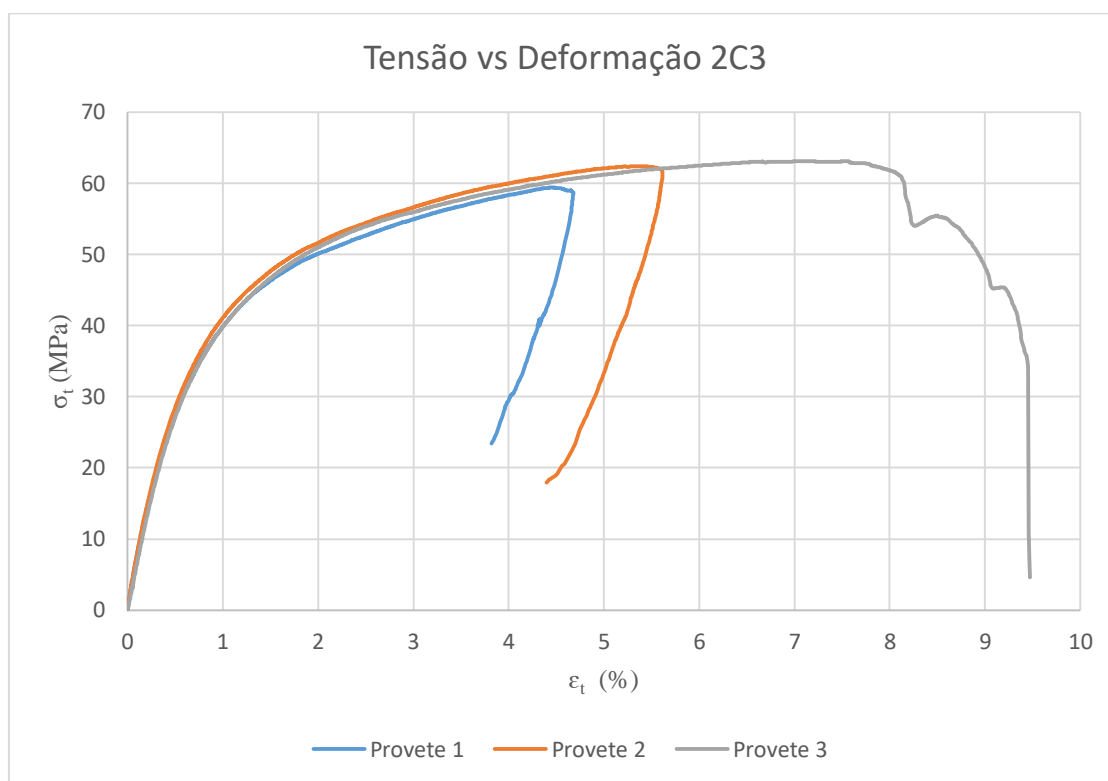


Figura 45 - Curva Tensão vs Deformação (2C3).

Verificou-se, para a placa 2C3, que o comportamento dos provetes cortados longitudinalmente na placa apresentaram deformações inferiores ao provete cortado transversalmente. Contudo, no que respeita à tensão máxima atingida e ao módulo de elasticidade os valores variaram pouco entre os três provetes.

Tabela 15 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa 2C3.

Provete L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_t (MPa)	Deformação ϵ_t (%)	Módulo E_t (GPa)
1 L	24.72	1.63	59.39	4.49	6.29
2 L	25.17	1.63	62.39	5.37	6.52
3 T	25.13	1.59	63.09	7.57	6.36
Valor médio	25.01	1.62	61.62	5.81	6.39
Desvio padrão	0.25	0.02	1.97	1.59	0.12

4.2.1.5 Resultados da placa C2C

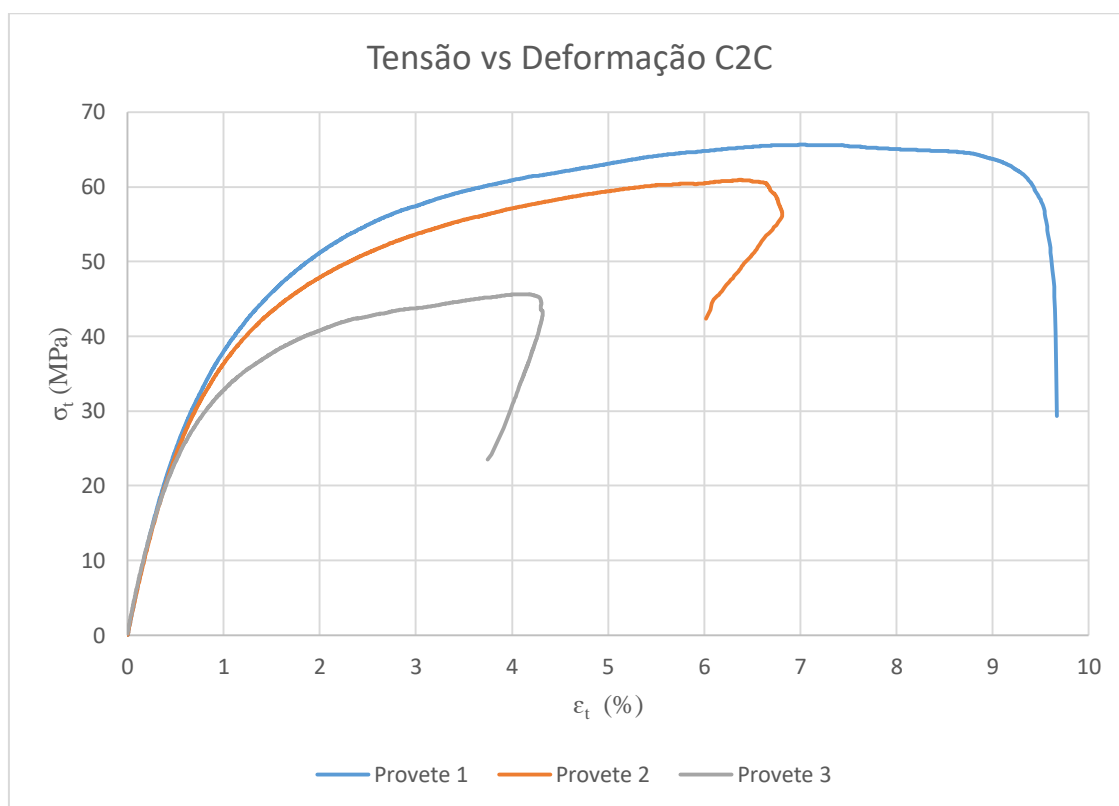


Figura 46 - Curva Tensão vs Deformação (C2C).

Relativamente aos provetes da placa C2C verificou-se que os provetes 1 e 2, cortados longitudinalmente, apresentaram maior tensão e deformação do que o provete 3, cortado transversalmente, no entanto em termos de módulo de elasticidade a diferença foi quase nula entre os três.

Tabela 16 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa C2C.

Proвете L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_t (MPa)	Deformação ϵ_t (%)	Módulo E_t (GPa)
1 L	25.04	2.02	65.67	7.06	5.53
2 L	24.81	2.05	60.93	6.39	5.35
3 T	24.71	1.91	45.66	4.07	5.30
Valor médio	24.85	1.99	57.42	5.84	5.39
Desvio padrão	0.17	0.07	10.46	1.57	0.12

4.2.1.6 Resultados da placa C3C

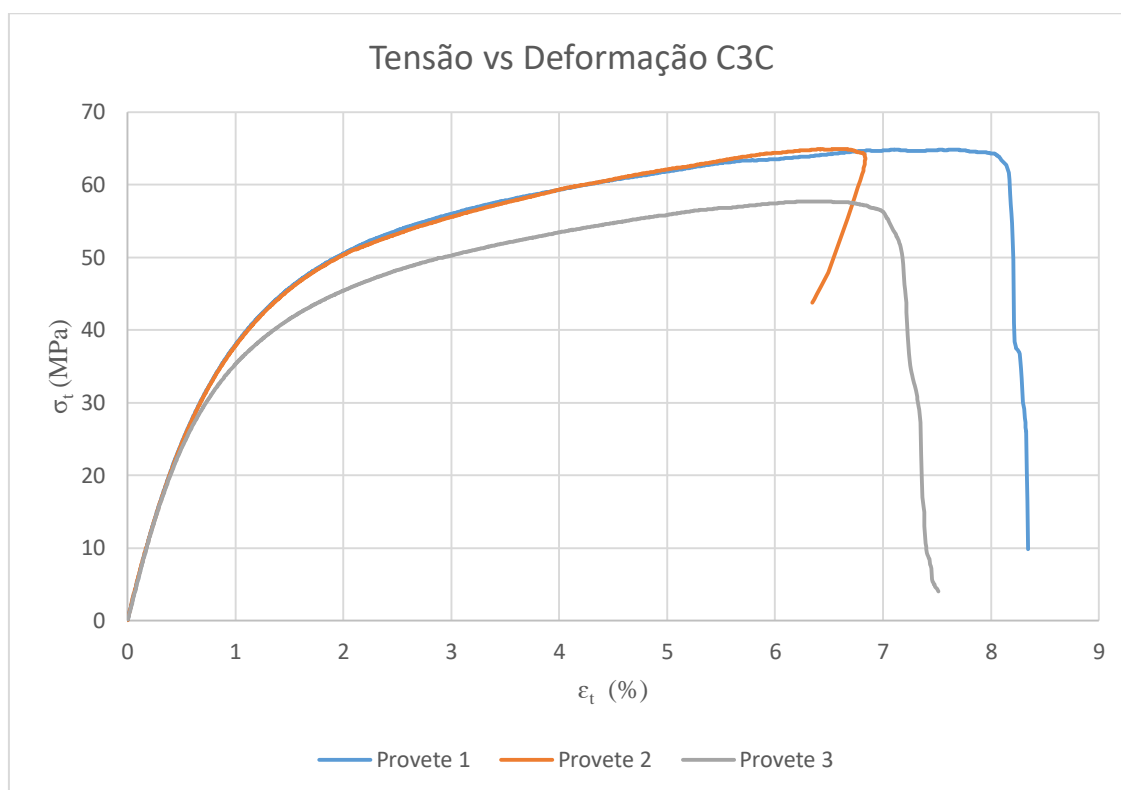


Figura 47 - Curva Tensão vs Deformação (C3C).

À semelhança do que havia sido verificado na placa homóloga da C3C os provetes 1 e 2, cortados longitudinalmente, apresentaram maior tensão e deformação do que o provete 3, cortado transversalmente, no entanto em termos de módulo de elasticidade a diferença também foi quase nula entre os três.

Tabela 17 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa C3C.

Provete L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_t (MPa)	Deformação ϵ_t (%)	Módulo E_t (GPa)
1 L	25.25	2.08	64.89	7.68	5.38
2 L	25.14	2.12	64.92	6.61	5.34
3 T	25.13	2.01	57.75	6.27	5.44
Valor médio	25.17	2.07	62.52	6.86	5.39
Desvio padrão	0.07	0.06	4.13	0.74	0.05

4.2.1.7 Resultados da placa C23C

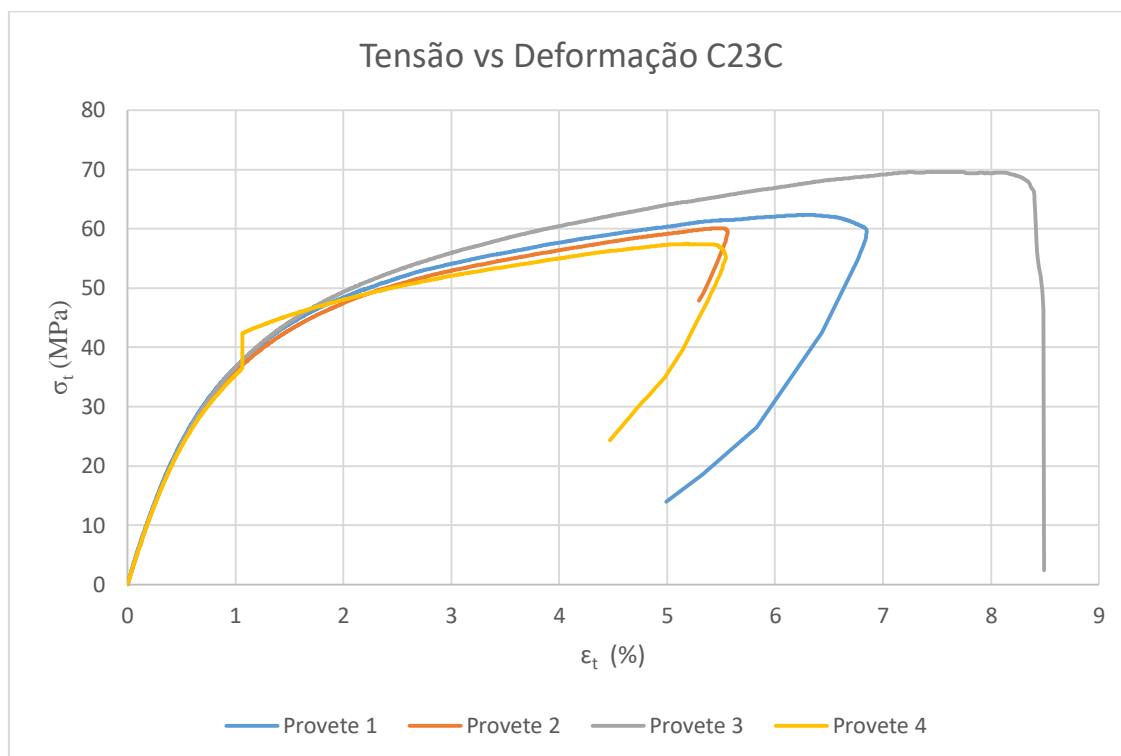


Figura 48 - Curva Tensão vs Deformação (C23C).

Para a placa C23C verificou-se que o provete 3, cortado transversalmente, teve uma deformação e tensão máxima superiores às dos provetes 1 e 2. No que respeita ao módulo de elasticidade os valores foram bastante idênticos.

Tabela 18 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa C23C.

Provete L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_t (MPa)	Deformação ϵ_t (%)	Módulo E_t (GPa)
1 L	24.82	2.06	62.29	6.37	5.32
2 L	24.38	2.05	60.08	5.52	5.24
3 T	24.85	2.13	69.61	7.58	5.21
4 L	24.65	2.10	57.45	5.20*	5.19
Valor médio	24.67	2.09	62.36	6.49	5.24
Desvio padrão	0.22	0.04	5.23	1.04	0.05

*Valor desprezado por escorregamento do extensómetro.

4.2.1.8 Resultados da placa C2C3C

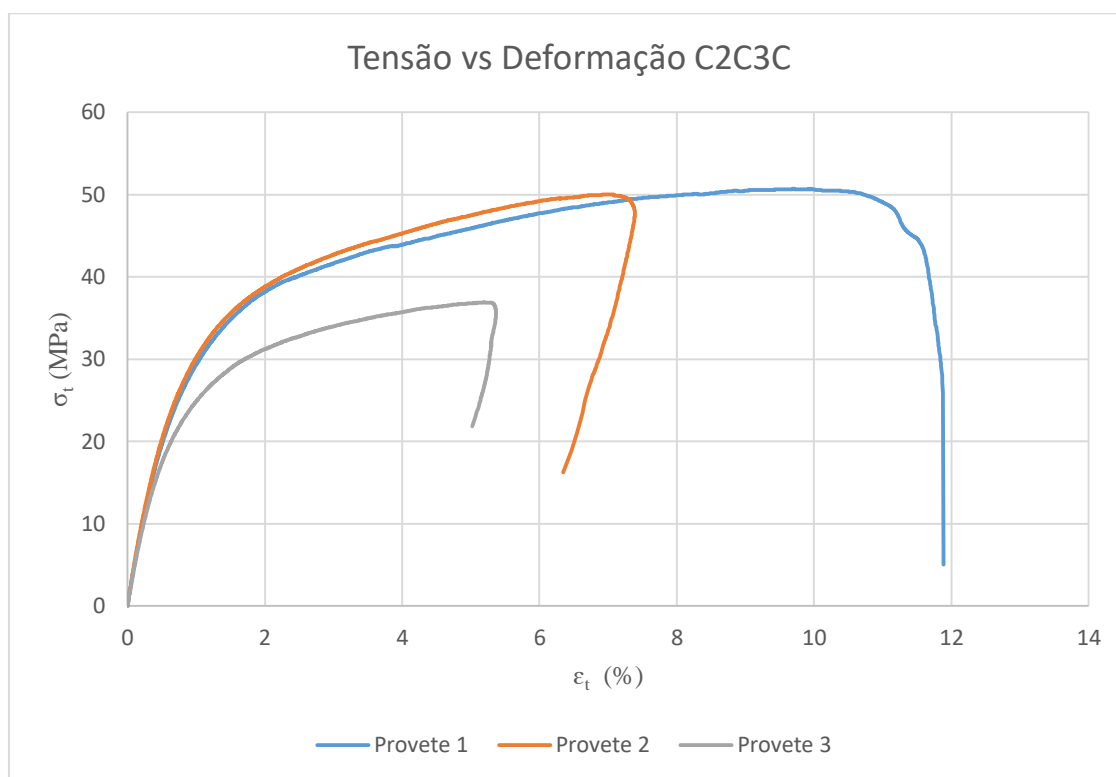


Figura 49 - Curva Tensão vs Deformação (C2C3C).

Relativamente aos provetes da solução com o maior número de filmes de cortiça, a placa C2C3C, verificou-se que os provetes 1 e 2, cortados longitudinalmente, apresentaram maior módulo de elasticidade e maior tensão e deformação do que o provete 3, cortado transversalmente.

Tabela 19 - Valores dos provetes dos ensaios de tração da placa C2C3C.

Proвете L: Longitudinal T: Transversal	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ _t (MPa)	Deformação ε _t (%)	Módulo E _t (GPa)
1 L	24.81	2.37	50.68	9.69	4.42
2 L	24.94	2.39	50.01	7.01	4.57
3 T	24.79	2.41	36.90	5.20	4.05
Valor médio	24.85	2.39	45.86	7.30	4.34
Desvio padrão	0.08	0.02	7.77	2.26	0.27

4.2.2 Análise dos resultados dos ensaios de tração

A análise do comportamento das placas quando solicitadas a esforços de tração é mais simples comparativamente à análise feita aos resultados dos ensaios de flexão, pelo facto de a variável posição do filme de cortiça não ser tão relevante em tração. Desta forma as placas homólogas serão analisadas em conjunto, ou seja, a placa 1C2 com a 3C4 e a C2C com a C3C.

Como seria de esperar a introdução da cortiça no laminado também reduz consideravelmente (cerca de 45%) a sua tensão máxima à tração assim como o seu módulo de elasticidade (cerca de 40%). Dentro do grupo das placas com filmes de cortiça também se pode perceber, pela análise da **Figura 50**, que quanto maior o número de filmes de cortiça na placa menor será a tensão máxima, sendo que na solução com três filmes a diferença é mais significativa. A queda dos valores de tensão máxima relativamente à placa de referência não são tão expressivos como nos ensaios de flexão pelo facto de o fenómeno de delaminação não ser tão intenso devido à ausência de forças de compressão, que são catalisadoras desse fenómeno redutor das propriedades mecânicas.

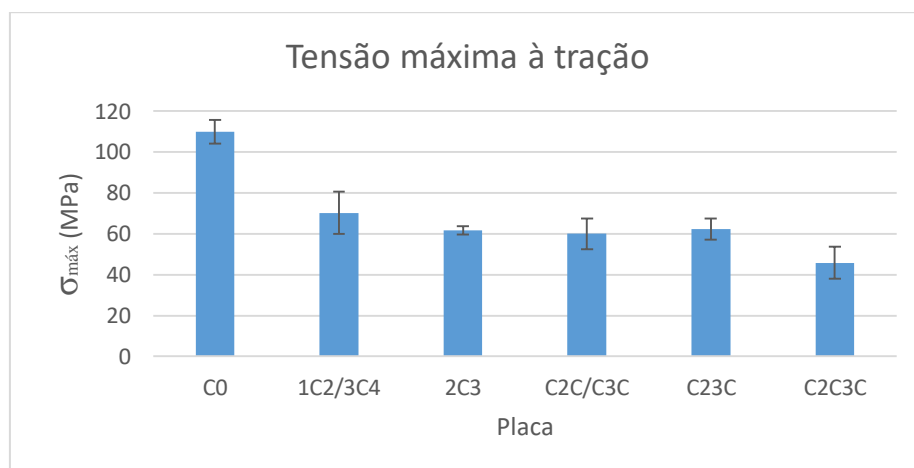


Figura 50 - Tensão máxima média à tração.

Para o caso do módulo de elasticidade, como se pode ver na **Figura 51** a tendência é a mesma da tensão máxima vista anteriormente. Ou seja, quanto maior o número de filmes menor o módulo.

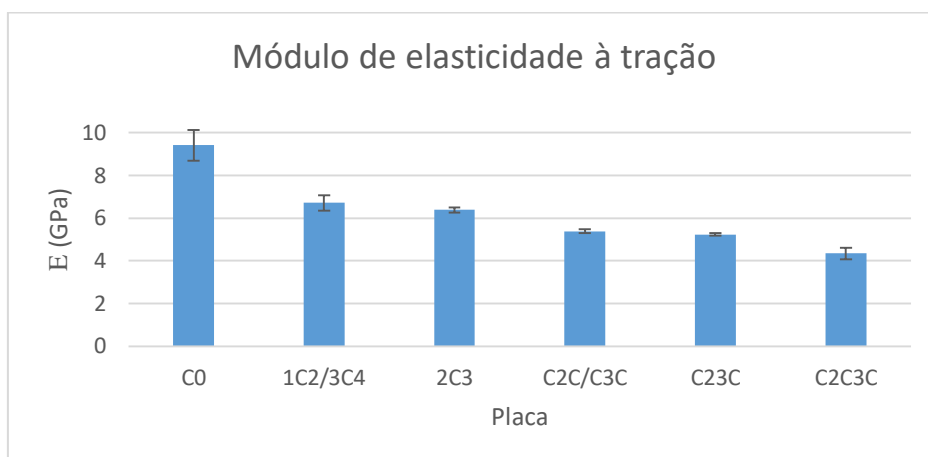


Figura 51 - Módulo de elasticidade médio à tração.

Ao contrário dos valores registados no módulo de elasticidade que apresentaram desvios padrões relativamente pequenos, os valores da deformação para cada placa são mais dispersos entre si, como se pode ver na **Figura 52**. No entanto, no cômputo geral, a diferença da deformação máxima entre placas não ultrapassa os dois pontos percentuais, além de que não é perceptível nenhuma tendência nestes resultados quanto à relação entre a deformação máxima e a quantidade e/ou posição dos filmes de cortiça no laminado.

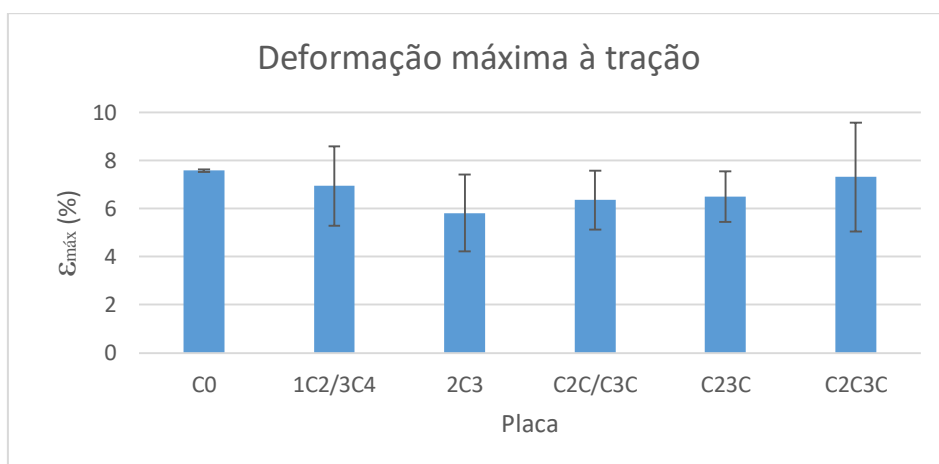


Figura 52 - Deformação máxima média à tração.

4.3 ENSAIOS DE IMPACTO

Os ensaios de impacto foram realizados na máquina de ensaios ROSAND – *Instrumented Falling Weight Impact Tester, Type 5 H.V.*, que está disponível no Laboratório de Ensaaios Tecnológicos da FEUP e permite estudar o comportamento de materiais submetidos a impactos de baixa velocidade através da queda de um peso. Estes ensaios foram baseados na norma ASTM D 5628-96.

O impacto controlado é conseguido com a queda de um impactor com geometria variável acoplado ou não a uma massa adicional, sobre um provete, com uma determinada energia. Foram estudados três níveis de energia de impacto: 4, 6 e 8 J, tendo sido ensaiados dois provetes de cada placa por cada nível. As diferentes energias de impacto são conseguidas com base na massa do conjunto impactor + massa adicional (se necessário) e altura da queda.

A máquina utilizada para a realização destes ensaios, e que é possível ver na **Figura 53**, é constituída por 3 partes principais: uma torre, onde ocorre a queda do peso, uma unidade de controlo e um programa de computador que faz a aquisição dos resultados durante o impacto. Os provetes são colocados num suporte cilíndrico e oco sob a torre e imobilizados por um braço mecânico cuja cabeça é igualmente cilíndrica e oca, permitindo desta forma simular uma situação de encastramento, caso seja esse o objetivo, como foi o caso. Durante o ensaio, um sistema pneumático “agarra” o impactor após o primeiro impacto para que não ocorram múltiplos impactos.

A partir de um computador o operador controla a máquina. Esse computador possui um *software* que permite o controlo de várias variáveis, como por exemplo a frequência de aquisição de dados e a energia de impacto.



Figura 53 - Ensaio de impacto.

4.3.1 Resultados obtidos nos ensaios de impacto

4.3.1.1 Resultados da placa C0

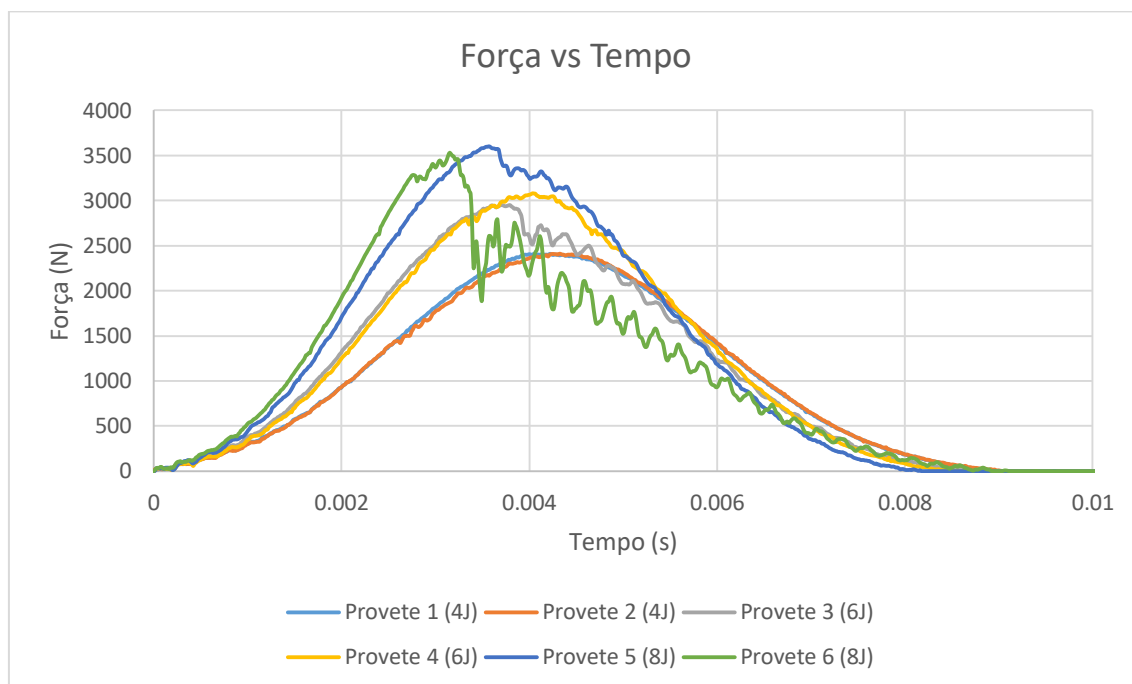


Figura 54 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa C0.

Como se pode ver na **Figura 54**, pela irregularidade das curvas, os provetes sujeitos a impactos de maior energia quebraram, enquanto os restantes apresentaram algumas delaminagens (pequenas ondulações na curva).

Tabela 20 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa C0.

	Proвете	Força no pico (N)	Deflexão no pico (mm)	Deflexão final (mm)	Energia no pico (J)	Energia final (J)
4J	1	2407.42	4.68	1.26	3.97	1.87
	2	2409.99	4.90	1.49	4.21	2.09
6J	3	2948.96	4.13	1.06	5.55	3.99
	4	3079.85	5.65	2.16	6.05	3.55
8J	5	3600.86	5.96	2.51	7.46	5.05
	6	3529.00	5.51	3.18	6.76	6.71

4.3.1.2 Resultados da placa 1C2

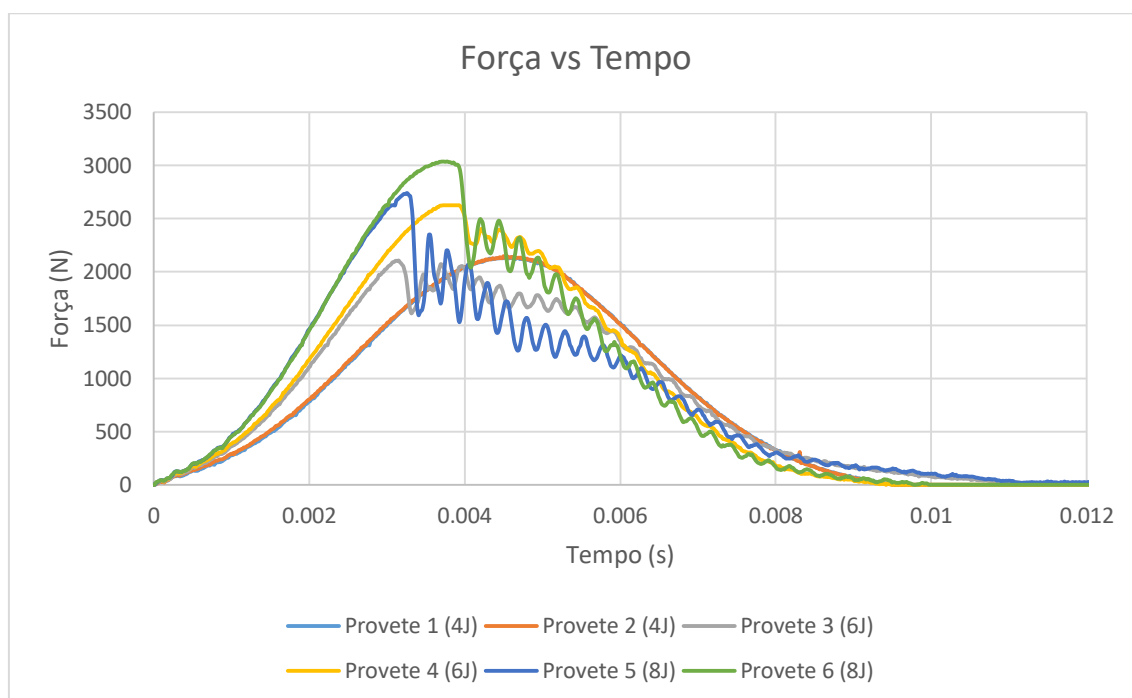


Figura 55 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa 1C2.

No caso da placa 1C2 apenas os provetes impactados com 4J de energia não quebraram nem apresentaram indícios de delaminação. Para impactos de 4J a placa absorveu 63% da energia, para impactos de 6J absorveu 83% e por fim para impactos de 8J absorveu 92%.

Tabela 21 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa 1C2.

	Proвете	Força no pico (N)	Deflexão no pico (mm)	Deflexão final (mm)	Energia no pico (J)	Energia final (J)
4J	1	2140.50	5.21	2.19	4.24	2.62
	2	2148.20	5.08	2.00	4.13	2.45
6J	3	2107.13	5.08	3.02	3.98	5.32
	4	2625.57	5.56	2.61	5.43	4.59
8J	5	2741.07	5.87	4.12	6.03	7.76
	6	3036.22	6.32	3.50	7.32	7.02

4.3.1.3 Resultados da placa 3C4

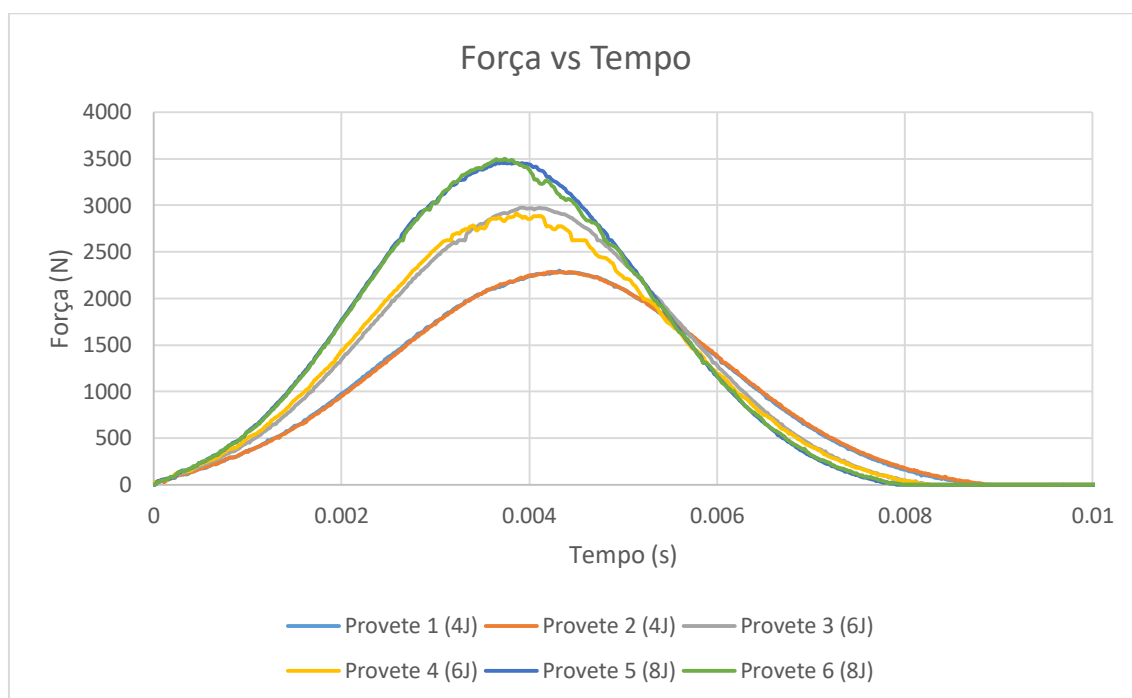


Figura 56 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa 3C4.

No caso da placa 3C4, cuja cortiça estava mais próxima da zona de impacto, os provetes impactados com maiores energias apresentaram fortes delaminagens, no entanto não apresentaram quebras significativas, como por exemplo na placa homóloga 1C2. Para impactos de 4J a placa absorveu 59% da energia, para impactos de 6J absorveu 61% e por fim para impactos de 8J absorveu 66%.

Tabela 22 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa 3C4.

	Provete	Força no pico (N)	Deflexão no pico (mm)	Deflexão final (mm)	Energia no pico (J)	Energia final (J)
4J	1	2299.62	4.78	1.85	4.22	2.37
	2	2284.22	4.78	1.82	4.16	2.37
6J	3	2974.62	5.40	2.16	5.93	3.49
	4	2910.46	5.34	2.22	6.02	3.81
8J	5	3459.70	5.96	2.72	7.78	5.20
	6	3500.77	6.02	2.74	7.91	5.31

4.3.1.4 Resultados da placa 2C3

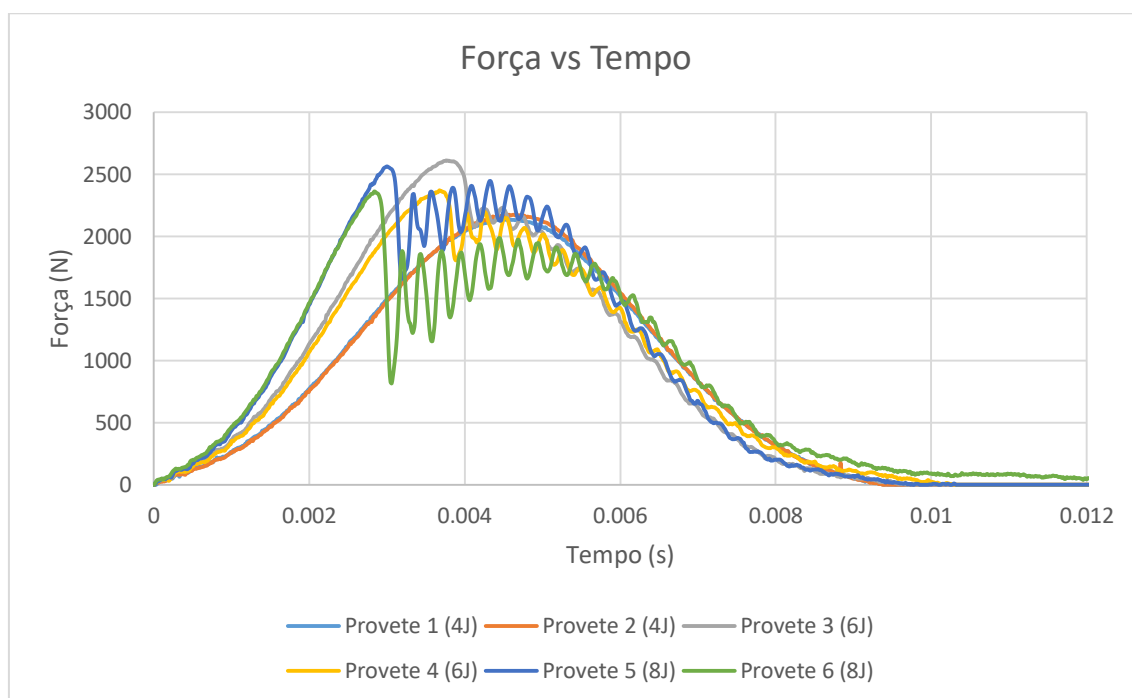


Figura 57 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa 2C3.

No caso da placa 2C3 apenas os provetes impactados com 4J de energia não quebraram nem apresentaram indícios de delaminação. Para impactos de 4J a placa absorveu 65% da energia, para impactos de 6J absorveu 85% e por fim para impactos de 8J absorveu 93%.

Tabela 23 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa 2C3.

	Provetes	Força no pico (N)	Deflexão no pico (mm)	Deflexão final (mm)	Energia no pico (J)	Energia final (J)
4J	1	2150.72	5.24	2.42	4.22	2.70
	2	2173.81	5.17	2.22	4.14	2.48
6J	3	2612.75	5.67	3.06	5.48	5.02
	4	2371.47	5.64	3.25	5.05	5.13
8J	5	2563.98	5.60	4.31	5.21	7.20
	6	2361.22	5.38	4.11	4.73	7.68

4.3.1.5 Resultados da placa C2C

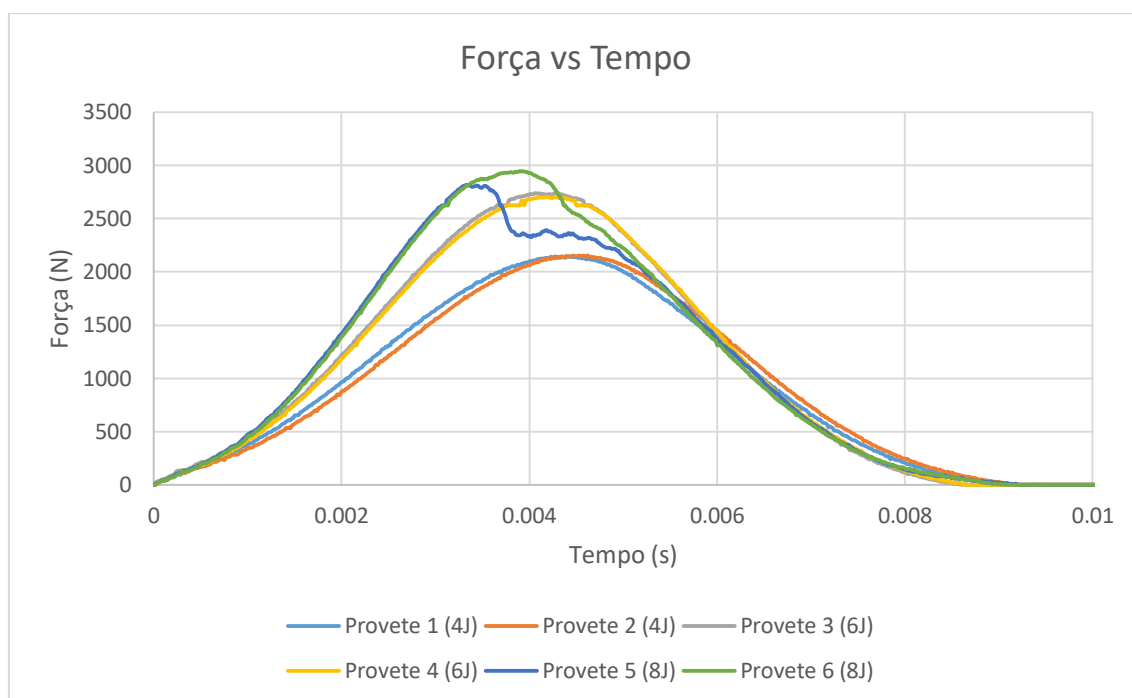


Figura 58 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa C2C.

No caso da placa C2C apenas um dos provetes apresentou uma quebra visível, e nos provetes impactados com 4 e 6J os indícios de delaminação foram imperceptíveis. Para impactos de 4J a placa absorveu 65% da energia, para impactos de 6J absorveu 67% e por fim para impactos de 8J absorveu 85%.

Tabela 24 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa C2C.

	Provete	Força no pico (N)	Deflexão no pico (mm)	Deflexão final (mm)	Energia no pico (J)	Energia final (J)
4J	1	2148.24	4.83	2.02	4.21	2.60
	2	2155.82	5.01	2.16	4.25	2.59
6J	3	2741.08	5.65	2.64	5.96	4.01
	4	2705.09	5.74	2.79	6.01	4.06
8J	5	2818.05	5.98	4.12	6.24	6.97
	6	2946.31	6.48	3.77	7.55	6.63

4.3.1.6 Resultados da placa C3C

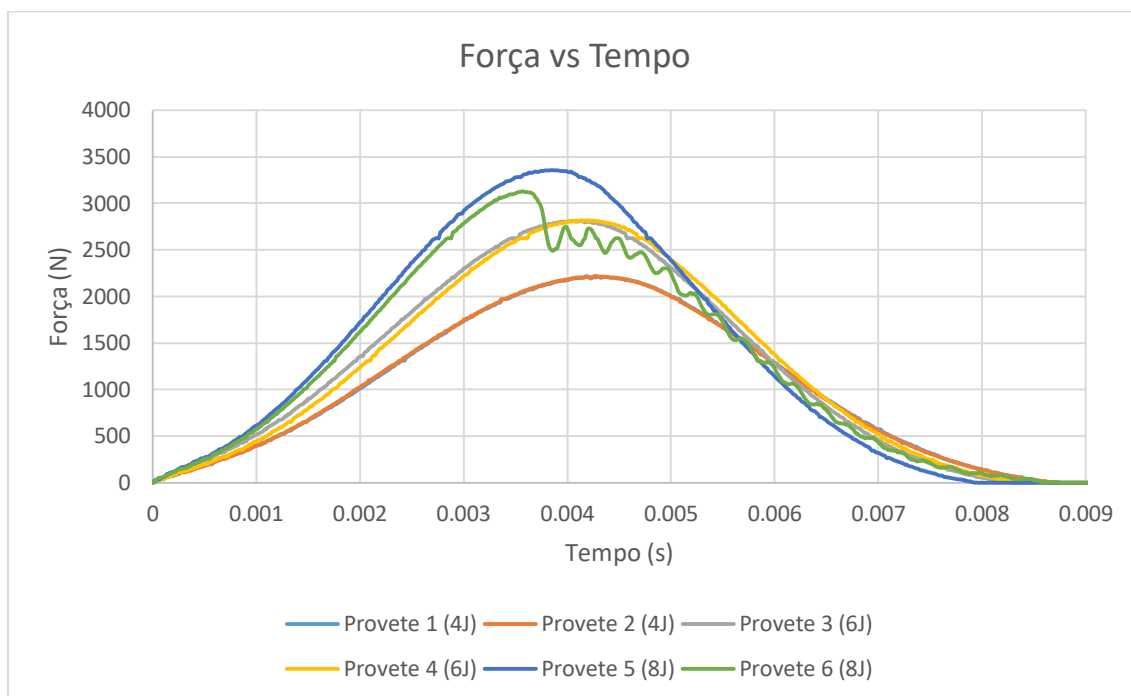


Figura 59 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa C3C.

À semelhança da placa homóloga C2C, no caso da placa C3C também apenas um dos provetes apresentou uma quebra visível e nos provetes impactados com 4 e 6J os indícios de delaminação foram imperceptíveis. Para impactos de 4J a placa absorveu 64% da energia, para impactos de 6J absorveu 66% e por fim para impactos de 8J absorveu 75%.

Tabela 25 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa C3C.

	Provete	Força no pico (N)	Deflexão no pico (mm)	Deflexão final (mm)	Energia no pico (J)	Energia final (J)
4J	1	2217.52	4.70	2.07	4.15	2.59
	2	2222.61	4.69	1.98	4.18	2.54
6J	3	2810.31	5.49	2.55	6.11	4.03
	4	2818.09	5.61	2.62	6.03	3.89
8J	5	3357.03	6.03	2.95	7.98	5.50
	6	3128.64	5.98	3.26	7.30	6.42

4.3.1.7 Resultados da placa C23C

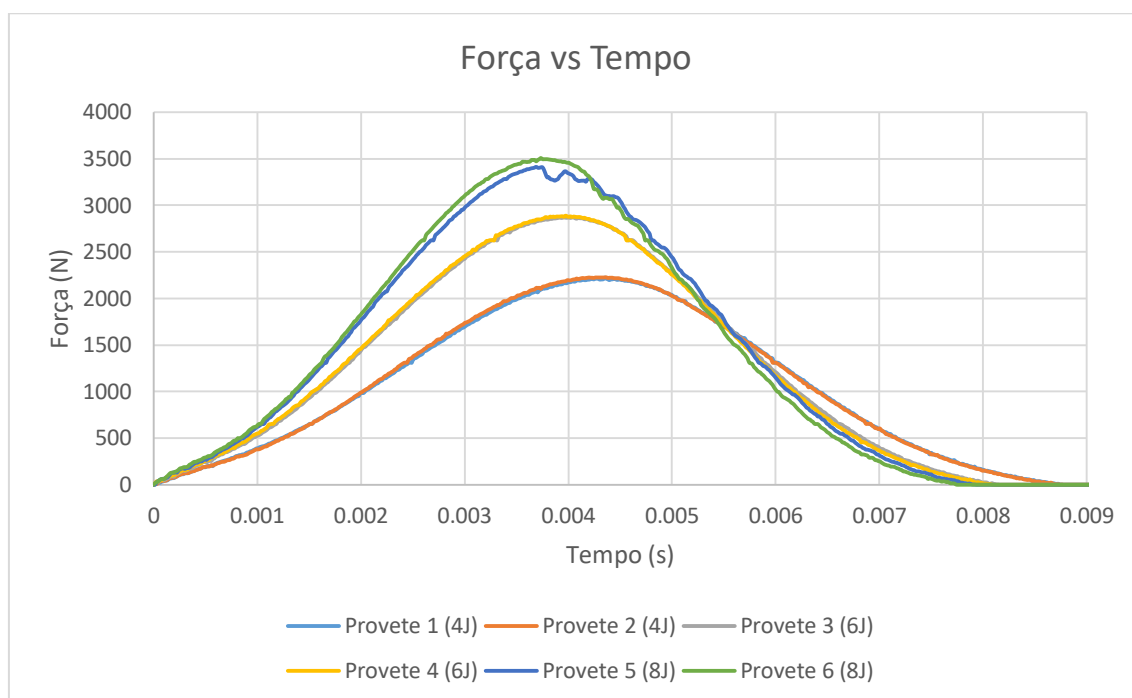


Figura 60 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa C23C.

No caso da placa C23C apenas um dos provetes apresentou uma ligeira quebra e nos restantes provetes os indícios de delaminação foram impercetíveis. Para impactos de 4J a placa absorveu 63% da energia, para impactos de 6J absorveu 64% e por fim para impactos de 8J absorveu 66%.

Tabela 26 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa C23C.

	Proвете	Força no pico (N)	Deflexão no pico (mm)	Deflexão final (mm)	Energia no pico (J)	Energia final (J)
4J	1	2225.16	4.76	2.02	4.19	2.52
	2	2227.76	4.76	1.99	4.23	2.51
6J	3	2869.33	5.31	2.29	6.01	3.76
	4	2889.94	5.32	2.33	6.15	3.86
8J	5	3413.55	5.91	2.77	7.78	5.28
	6	3508.45	5.88	2.75	7.98	5.34

4.3.1.8 Resultados da placa C2C3C

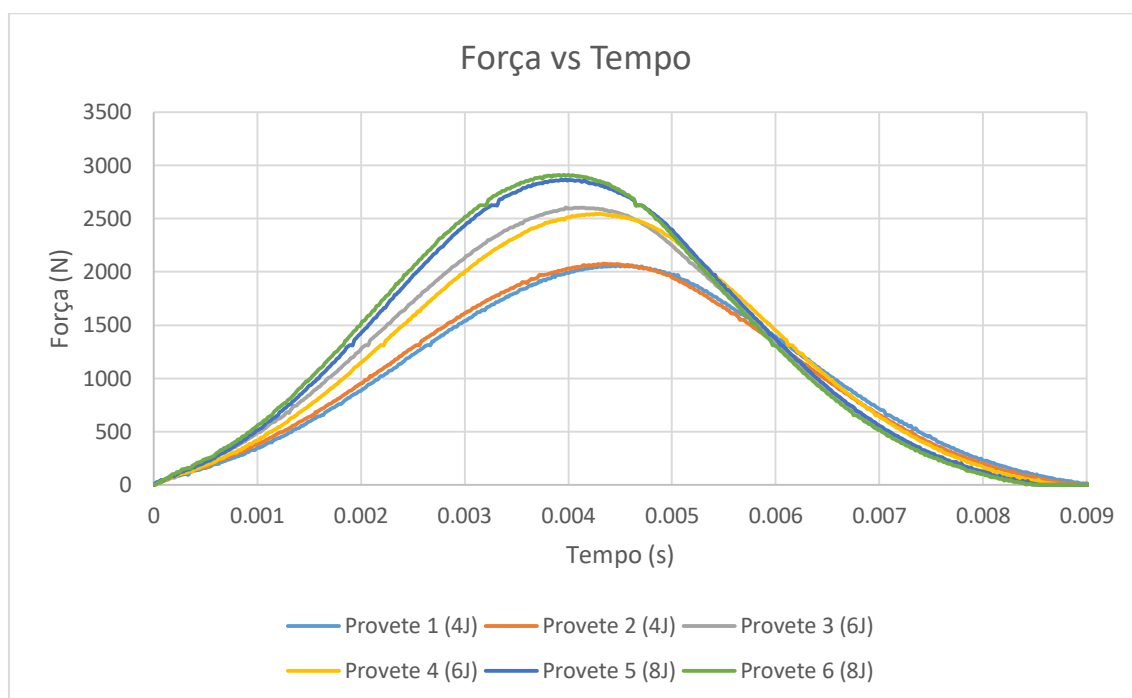


Figura 61 - Curva Força vs Tempo dos ensaios de impacto na placa C2C3C.

Por fim, para a solução com maior número de filmes de cortiça, a placa C2C3C, nenhum dos provetes impactados quebrou e os indícios de delaminação foram imperceptíveis. Para impactos de 4J a placa absorveu 67% da energia, para impactos de 6J absorveu 72% e para impactos de 8J absorveu 79%.

Tabela 27 - Valores relevantes dos ensaios de impacto na placa C2C3C.

	Provete	Força no pico (N)	Deflexão no pico (mm)	Deflexão final (mm)	Energia no pico (J)	Energia final (J)
4J	1	2060.87	4.89	2.35	4.06	2.66
	2	2076.30	4.79	2.27	4.09	2.69
6J	3	2604.96	5.52	2.91	5.80	4.25
	4	2546.08	5.83	3.21	5.98	4.40
8J	5	2869.38	6.44	3.98	7.62	6.39
	6	2910.52	6.29	3.70	7.63	6.26

4.3.2 Análise dos resultados dos ensaios de impacto

Antes de analisar os resultados obtidos deve referir-se que o impacto foi aplicado na superfície lisa da placa, ou seja, na camada mais inferior aquando da sua fabricação. A presença ou não da cortiça e qual a sua posição no laminado ganha especial importância neste tipo de ensaios. Começa-se, então, por comparar os gráficos Força vs Tempo da placa C0, sem filmes de cortiça, e da 3C4, com o filme de cortiça mais próximo da zona de impacto. Para isso, selecionou-se uma curva representativa dos ensaios de impacto realizados em cada placa para a situação de maior energia ensaiada (8J), que é o nível de energia onde se observaram as transições comportamentais mais relevantes. Esta comparação específica permitirá perceber a grande influência que a presença da cortiça tem num laminado para diminuir o dano provocado por um impacto. É possível perceber, pela análise da **Figura 62**, que para o nível de 8J a placa C0 quebra ao ser atingida a força máxima, o que se conclui pela curva descendente irregular do gráfico. No entanto, com a introdução de apenas um filme de cortiça próximo da zona de impacto, que é o caso da placa 3C4, já não é visível, através da análise do gráfico, uma quebra. Observa-se apenas uma ligeira ondulação na curva descendente causada por pequenas delaminagens na zona de impacto.

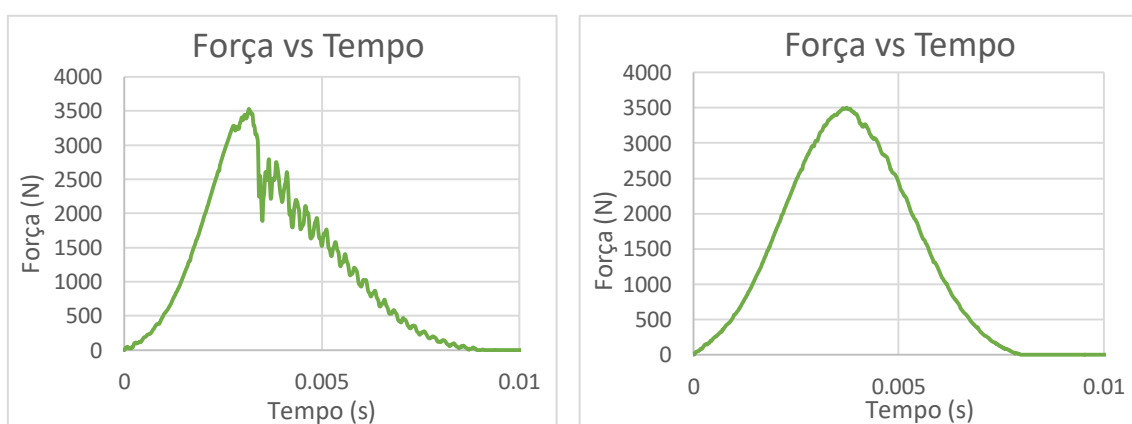


Figura 62 - Comparação dos gráficos Força vs Tempo da placa C0 (esquerda) e 3C4 (direita).

Após se comparar o efeito de uma das variáveis deste problema, que é a presença ou não de cortiça, procedeu-se à comparação de outra variável, que é a posição da cortiça no laminado. Mantendo-se constante o número de filmes de cortiça, neste caso um. Verificou-se que os dois provetes sujeitos a um impacto de 8J, para cada uma das placas 1C2 e 2C3, quebraram (não confundir com perfuraram), e os dois da placa 3C4 não. Ou seja, no que respeita à posição do filme de cortiça a solução da placa 3C4 revelou-se a mais vantajosa na preservação das propriedades estruturais do laminado, sendo a única a evitar uma quebra do provete na situação de um impacto de 8J. O facto de o filme de cortiça estar posicionado mais próximo da face impactada permitiu absorver uma grande quantidade de energia “à entrada” do laminado e desta forma proteger as camadas adjacentes de fibra de vidro.

No que respeita à quebra dos provetes para soluções com dois filmes de cortiça sujeitas a um impacto de 8J, os resultados não foram, no âmbito desta análise específica, mais animadores do que os das soluções com um filme de cortiça. Um em cada dois provetes das placas C2C, C3C e C23C, sujeitos a um impacto de 8J, quebraram ou apresentaram indícios de quebra. Dentro deste grupo a placa C23C foi a que apresentou os melhores resultados neste contexto.

A solução com três filmes de cortiça, a placa C2C3C, foi a que teve melhores resultados de todas as soluções ensaiadas, uma vez que não apresentou qualquer quebra, ou indícios de quebra, em nenhum dos seis provetes sujeitos a impacto. O que se justifica pelo efeito de “almofada” criado pela cortiça nas camadas internas de fibra de vidro protegendo-as de uma possível quebra.

Em termos de força máxima de impacto (devida à reação), como se pode ver na **Figura 63**, as placas C0, 3C4 e C23C foram as que apresentaram os resultados mais elevados em todos os níveis de energia ensaiados. Dentro do grupo de soluções com dois filmes de cortiça é visível uma tendência, sendo que a placa C23C apresentou sempre valores de força máxima iguais ou superiores aos registados para a placa C3C, e esta, por sua vez, apresentou sempre valores superiores em relação à sua placa homóloga C2C.

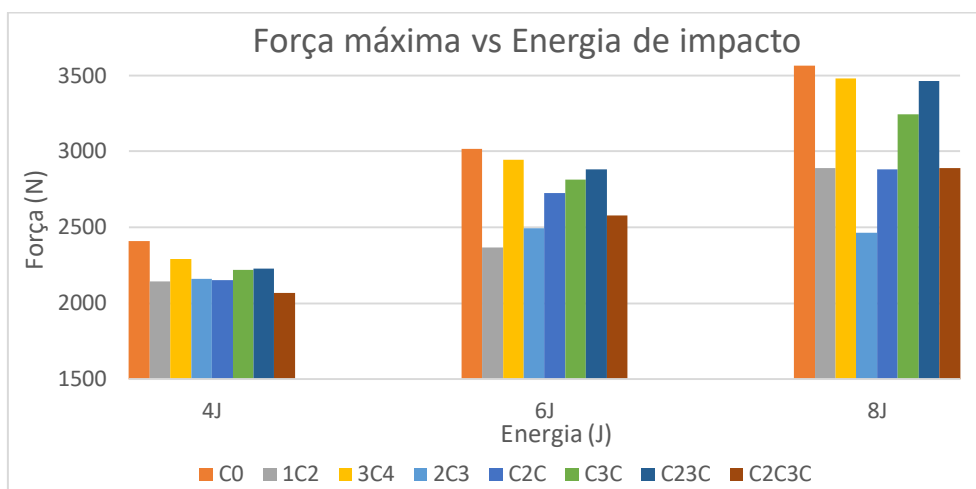


Figura 63 - Comparação da força máxima em função da energia de impacto.

No que respeita à deflexão final (entenda-se deflexão final como deflexão mais indentação), as placas 1C2, 2C3, C2C e C2C3C apresentaram sempre valores de deflexão final superiores aos das restantes placas, sendo que a placa 2C3 foi a que mais defletiu em todos os níveis de energia ensaiados. É possível detetar um padrão nestes resultados, ou seja, verificou-se que, de uma forma geral, as placas com um filme de cortiça entre as camadas 3 e 4 (3C4, C3C e C23C) defletiram menos do que as restantes, e as placas com um filme de cortiça entre as camadas 2 e 3 (2C3, C2C e C2C3C) defletiram mais do que as restantes.

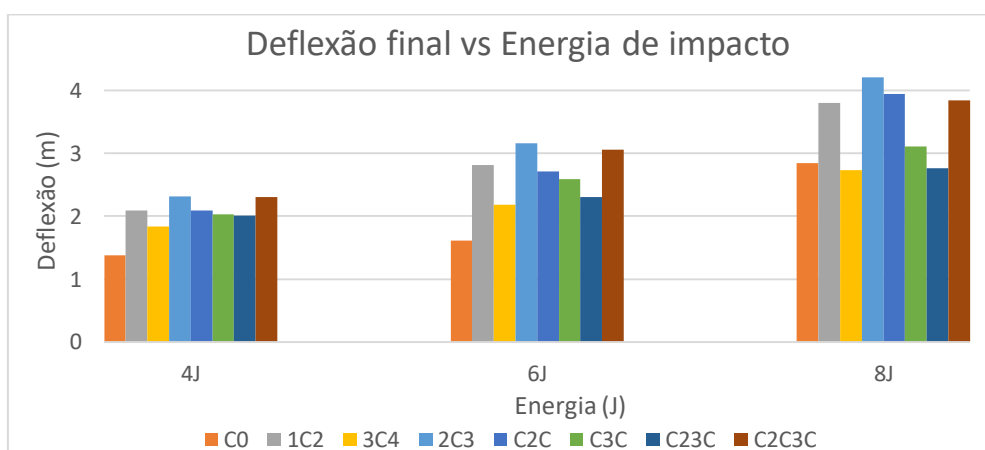


Figura 64 - Comparação da deflexão final em função da energia de impacto.

Relativamente à energia absorvida por cada placa, e em cada nível de energia de impacto, verificou-se que, para 4 J, os valores foram muito próximos e por isso pouco conclusivos. Já nos restantes níveis é possível notar um destaque claro das placas 1C2 e 2C3, com absorções de energia acima dos 90% para impactos de 8J, de notar ainda que as placas C2C e C2C3C apresentaram sempre valores acima dos registados para as restantes placas.

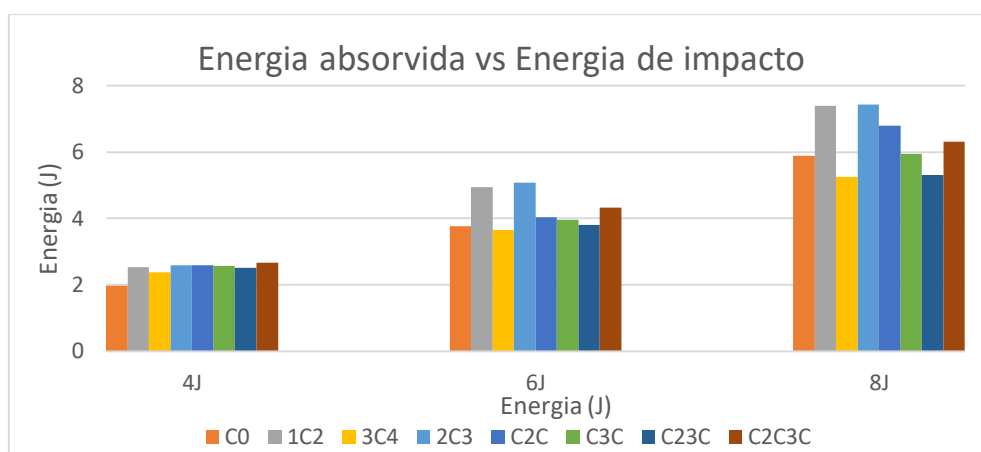


Figura 65 - Comparação da energia absorvida em função da energia de impacto.

4.4 ENSAIOS DE INDENTAÇÃO

A medição da indentação foi feita com um comparador analógico com curso de 100 mm e precisão de 0.01 mm. Fizeram-se quatro medições em cada provete, três delas em torno da depressão provocada pelo impacto, em pontos equidistantes, para obter um valor médio da cota superfície não deformada, e uma quarta na vizinhança do centro da área deformada, registrando-se o maior valor observado. Considera-se a indentação medida como final (permanente) uma vez que as medições foram feitas cerca de um mês depois dos ensaios de impacto.



Figura 66 – Ensaio de indentação.

4.4.1 Resultados obtidos nos ensaios de indentação

Nas tabelas abaixo apresentam-se os resultados obtidos nas medições de indentação de cada uma das placas.

Tabela 28 - Valores médios de indentação para a placa C0, em mm.

	4J		6J		8J	
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
C0	11.28	11.27	11.24	11.26	11.19	11.24
	11.26	11.24	11.28	11.24	11.27	11.25
	11.37	11.28	11.25	11.22	11.26	11.24
Média	11.30	11.26	11.26	11.24	11.24	11.24
Centro	11.21	11.18	11.01	11.04	11.07	11.06
Indentação	0.09	0.08	0.25	0.20	0.17	0.18
Média p/Energia	0.09		0.22		0.18	

Tabela 29 - Valores médios de indentação para a placa 1C2, em mm.

	4J		6J		8J	
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
1C2	11.51	11.63	11.51	11.55	11.51	11.59
	11.49	11.63	11.52	11.55	11.49	11.62
	11.52	11.66	11.5	11.58	11.42	11.52
Média	11.51	11.64	11.51	11.56	11.47	11.58
Centro	11.31	11.51	11.3	11.35	11.15	11.3
Indentação	0.20	0.13	0.21	0.21	0.32	0.28
Média p/Energia	0.16		0.21		0.30	

Tabela 30 - Valores médios de indentação para a placa 3C4, em mm.

	4J		6J		8J	
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
3C4	11.65	11.61	11.51	11.62	11.58	11.57
	11.82	11.7	11.67	11.74	11.65	11.6
	11.73	11.65	11.62	11.73	11.67	11.62
Média	11.73	11.65	11.60	11.70	11.63	11.60
Centro	11.5	11.37	11.21	11.35	11.23	11.28
Indentação	0.23	0.28	0.39	0.35	0.40	0.32
Média p/Energia	0.26		0.37		0.36	

Tabela 31 - Valores médios de indentação para a placa 2C3, em mm.

	4J		6J		8J	
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
2C3	11.55	11.56	11.41	11.45	11.41	11.41
	11.53	11.51	11.43	11.48	11.48	11.53
	11.55	11.5	11.41	11.47	11.45	11.41
Média	11.54	11.52	11.42	11.47	11.45	11.45
Centro	11.31	11.31	11.14	11.17	11.06	11.04
Indentação	0.23	0.21	0.28	0.30	0.39	0.41
Média p/Energia	0.22		0.29		0.40	

Tabela 32 - Valores médios de indentação para a placa C2C, em mm.

	4J		6J		8J	
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
C2C	11.85	11.83	11.7	11.74	11.69	11.67
	11.96	11.89	11.82	11.82	11.85	11.77
	11.92	11.88	11.77	11.88	11.82	11.75
Média	11.91	11.87	11.76	11.81	11.79	11.73
Centro	11.61	11.62	11.4	11.39	11.29	11.22
Indentação	0.30	0.25	0.36	0.42	0.50	0.51
Média p/Energia	0.27		0.39		0.50	

Tabela 33 - Valores médios de indentação para a placa C3C, em mm.

	4J		6J		8J	
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
C3C	11.95	11.97	11.98	11.89	11.93	11.95
	12.01	12.13	12	12.02	12.03	12.07
	12	12.05	12.01	12.01	12.04	11.91
Média	11.99	12.05	12.00	11.97	12.00	11.98
Centro	11.65	11.69	11.57	11.51	11.44	11.46
Indentação	0.34	0.36	0.43	0.46	0.56	0.52
Média p/Energia	0.35		0.45		0.54	

Tabela 34 - Valores médios de indentação para a placa C23C, em mm.

	4J		6J		8J	
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
C23C	12.07	12.04	11.91	12	11.93	11.94
	12.14	12.15	12.11	12.11	12.07	12.12
	12.09	12.07	12.05	12.07	12.07	12.08
Média	12.10	12.09	12.02	12.06	12.02	12.05
Centro	11.8	11.82	11.65	11.74	11.58	11.57
Indentação	0.30	0.27	0.37	0.32	0.44	0.48
Média p/Energia	0.28		0.35		0.46	

Tabela 35 - Valores médios de indentação para a placa C2C3C, em mm.

	4J		6J		8J	
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
C2C3C	12.25	12.2	12.19	12.15	12.15	12.15
	12.34	12.32	12.37	12.3	12.27	12.24
	12.29	12.35	12.3	12.35	12.3	12.3
Média	12.29	12.29	12.29	12.27	12.24	12.23
Centro	11.86	11.87	11.68	11.7	11.51	11.57
Indentação	0.43	0.42	0.61	0.57	0.73	0.66
Média p/Energia	0.43		0.59		0.69	

4.4.2 Análise dos resultados dos ensaios de indentação

Pela análise da **Figura 67**, que representa a indentação permanente para cada uma das placas, é possível verificar de imediato dois aspetos: o primeiro é o aumento, em média, da indentação permanente com o aumento da energia de impacto. O segundo é que a placa que tem mais camadas de cortiça, a C2C3C, é a que apresenta maior indentação, destacando-se claramente. Este pode ser considerado um aspeto positivo a favor desta solução com três filmes de cortiça porque, como já foi referido, a identificação precoce do dano é um dos fundamentos da tolerância ao dano. Assim, ao apresentar uma grande indentação, facilitará a identificação da região danificada por inspeção visual.

Após uma análise mais pormenorizada às restantes placas é possível concluir que, em média, quanto maior o número de camadas de cortiça na placa, maior é a sua indentação, tal como se previa, uma vez que a cortiça se trata de um material bastante compressível. De destacar também o facto de as placas 3C4 e C3C apresentarem, para todas as energias, indentações superiores às suas homólogas 1C2 e C2C, respetivamente. O que também seria de prever uma vez que o impacto ocorreu na face mais próxima da camada de cortiça.

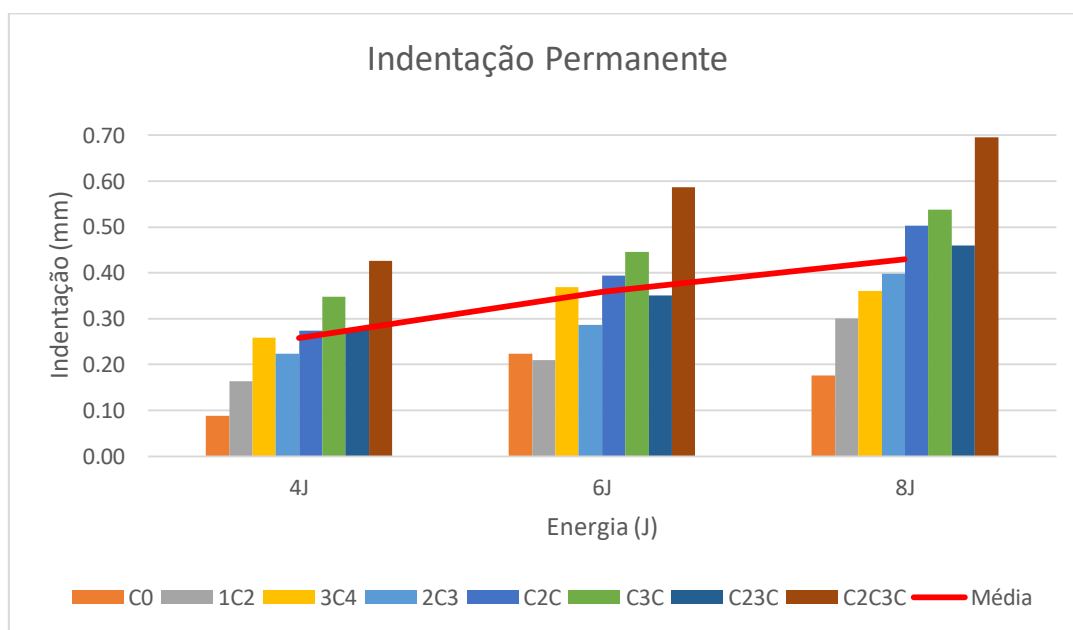


Figura 67 - Comparação dos resultados de indentação agrupados por nível de energia.

4.5 ENSAIOS DE TRAÇÃO APÓS IMPACTO (TAI)

O ensaio TAI, que é muito menos comum do que o CAI (compressão após impacto), foi aplicado em detrimento deste último por se considerar ainda assim um eficaz indicador do dano por impacto no laminado, e utilizar provetes de menores dimensões relativamente aos utilizados ensaios de CAI normalizados, que implicaria o fabrico de placas consideravelmente maiores (ou múltiplas placas por configuração). Uma vez que os materiais foram caracterizados em tração, tais resultados em conjunto com os de TAI poderão ser utilizados para estabelecer um critério de avaliação de dano após impacto. Desta forma, e não considerando ligeiras diferenças nas dimensões dos provetes, a única variável será a existência ou não de impacto.

Os ensaios de impacto foram realizados na mesma máquina referida no subcapítulo 4.3 e os ensaios de tração na mesma máquina referida no subcapítulo 4.2. Foram testados três níveis de energia: 2, 4 e 8 J, tendo sido ensaiados, para cada placa, dois provetes para o nível de energia de 2J e um provete para cada um dos restantes níveis.

Para a realização do impacto nos provetes dos ensaios TAI foi feita uma adaptação dos sistemas de fixação utilizados para ensaios CAI e TAI esquematizados na **Figura 68**.

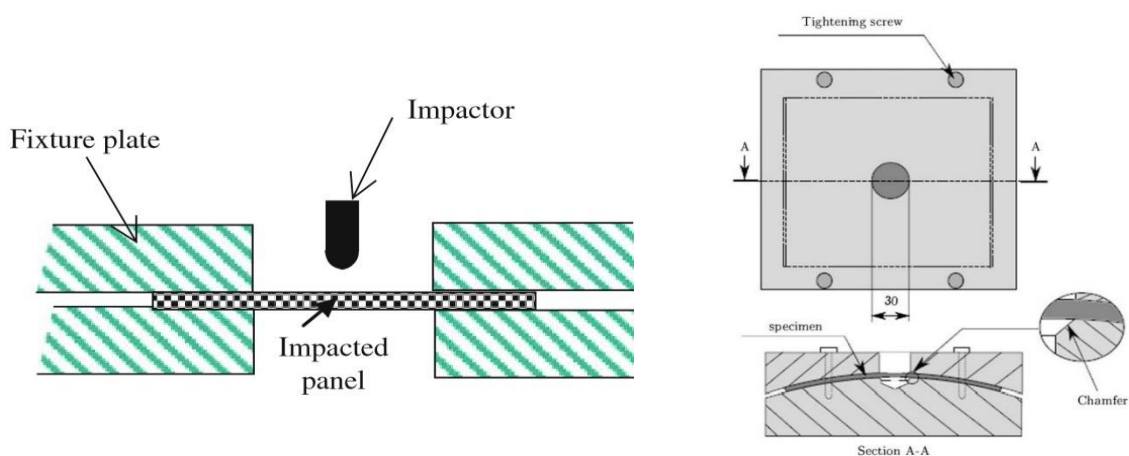


Figura 68 - Esquemas de fixação para impacto numa placa plana (esquerda)²⁸ e numa placa curva (direita)²⁹.

Uma vez que os provetes para os ensaios TAI tinham apenas 25 mm de largura não era possível ter uma situação de encastramento na placa no momento do impacto, tendo em conta que o orifício do mecanismo de suporte e fixação da máquina utilizada nos ensaios tinha um diâmetro de 40 mm. Por esse motivo, foi necessário produzir propositadamente três peças: dois casquilhos, para reduzir o diâmetro do orifício de 40 para 20 mm (ver **Figura 69**), e um impactor com uma ponta semiesférica de 7 mm, uma vez que o impactor disponível no laboratório tinha um diâmetro demasiado grande para esta nova solução (ver **Figura 70**).

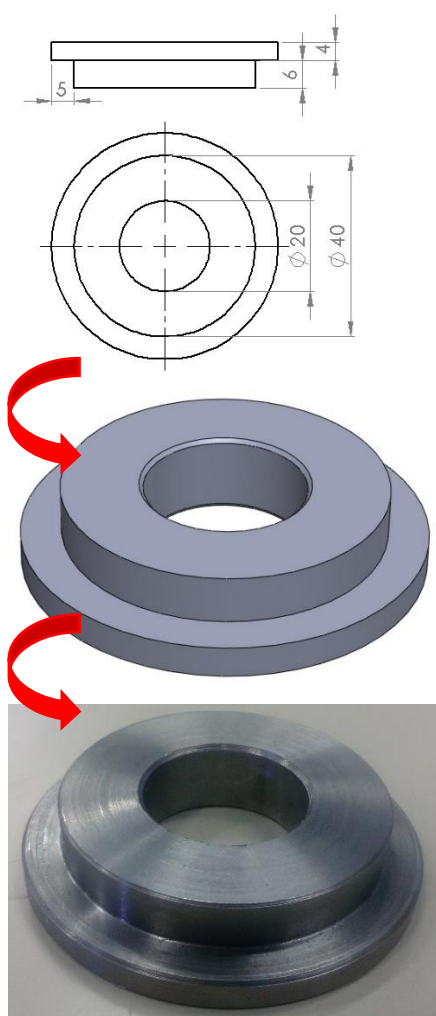


Figura 69 - Sequência de produção do casquilho (2x).

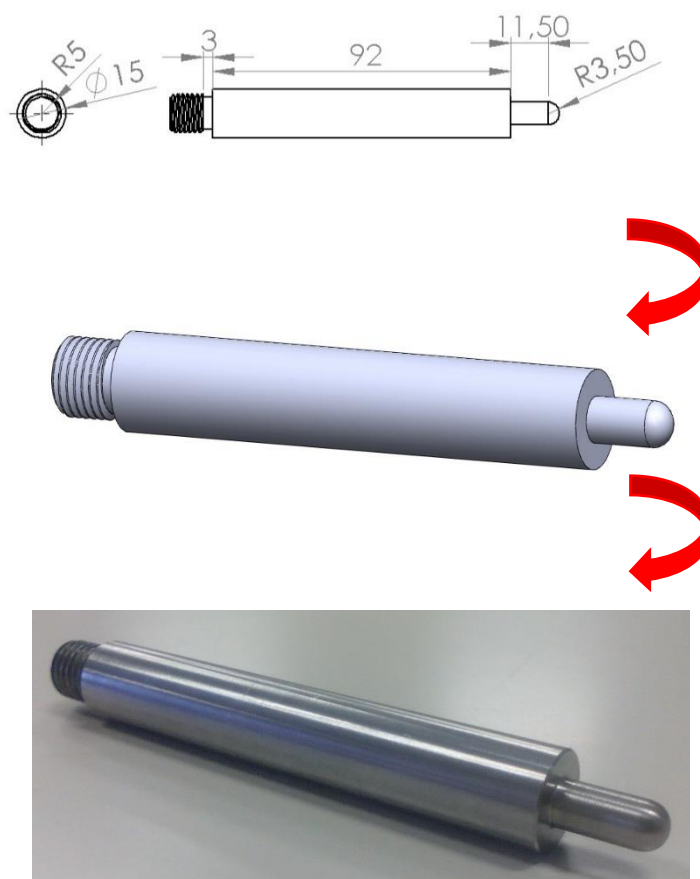


Figura 70 - Sequência de produção do impactor.

4.5.1 Resultados obtidos nos ensaios TAI

4.5.1.1 Resultados da placa C0

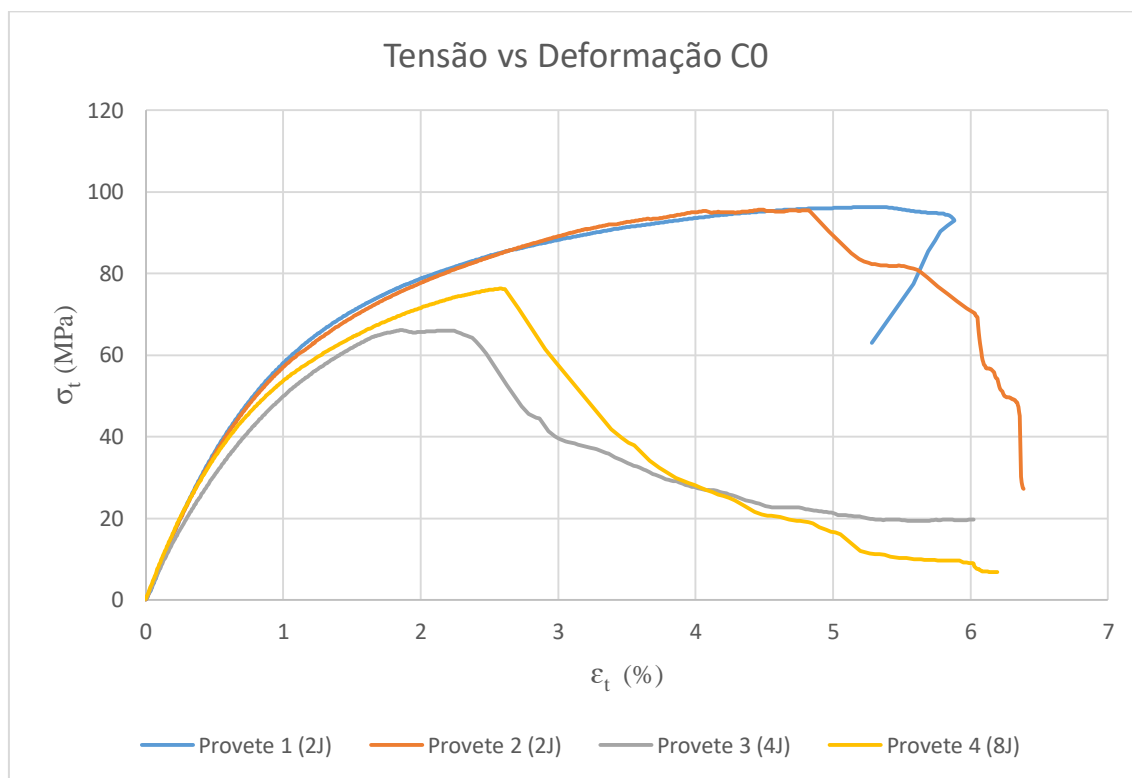


Figura 71 - Curva Tensão vs Deformação (C0).

Os provetes da placa C0 sujeitos a um impacto de 2J de energia apresentaram propriedades mecânicas mais elevadas nos ensaios de tração do que os sujeitos a impactos de maior energia. No entanto, o provete impactado com 8J apresentou propriedades mecânicas mais elevadas do que o impactado com 4J.

Tabela 36 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa C0.

	Provetes	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_t (MPa)	Deformação ϵ_t (%)	Módulo E_t (GPa)
2J	1	24.90	1.26	96.38	5.35	8.24
	2	25.01	1.18	95.65	4.46	7.90
4J	3	24.81	1.23	66.19	1.87	6.72
8J	4	24.87	1.18	76.29	2.59	7.76

4.5.1.2 Resultados da placa 1C2

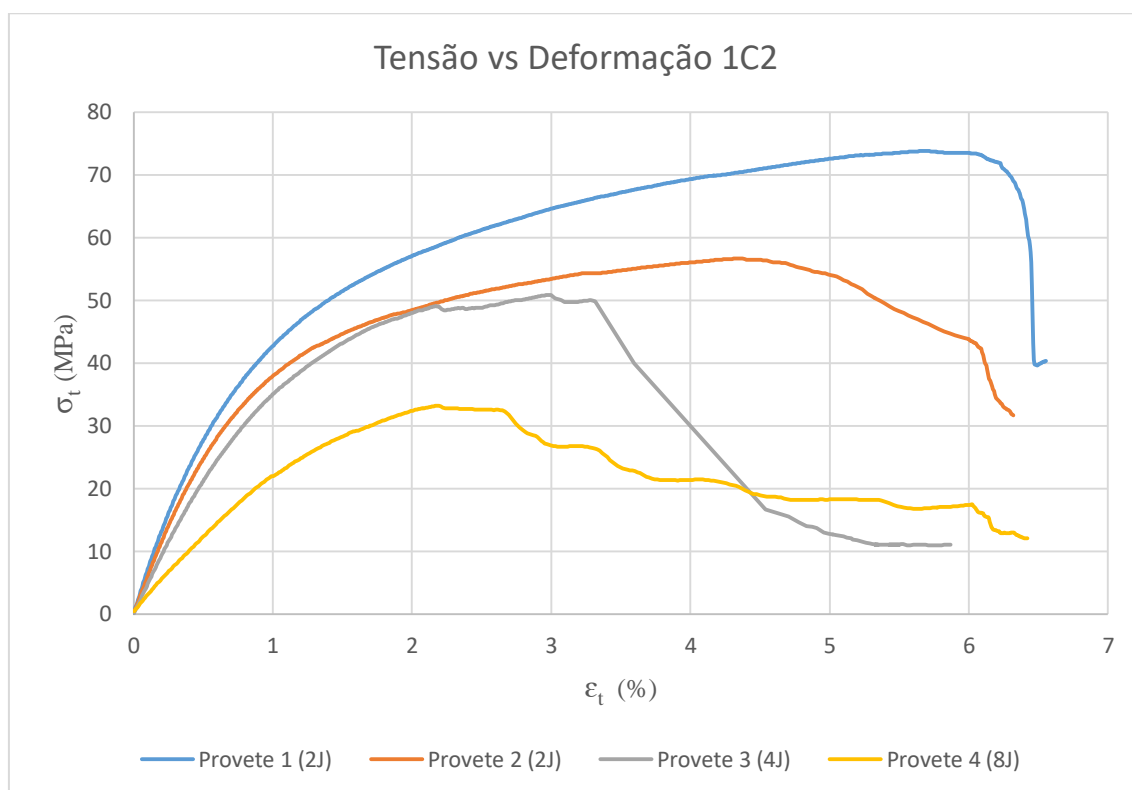


Figura 72 - Curva Tensão vs Deformação (1C2).

Os provetes da placa 1C2 sujeitos a impactos de energia mais elevada apresentaram, como se previa, propriedades mecânicas mais baixas nos ensaios de tração. A tensão máxima reduziu cerca de 22% de 2 para 4J de energia de impacto e 35% de 4 para 8J. Já o módulo de elasticidade reduziu 22% de 2 para 4J de energia de impacto e 45% de 4 para 8J.

Tabela 37 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa 1C2.

	Provete	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_t (MPa)	Deformação ϵ_t (%)	Módulo E_t (GPa)
2J	1	24.93	1.56	73.82	5.72	6.21
	2	24.33	1.51	56.75	4.38	5.53
4J	3	24.86	1.59	50.92	2.99	4.58
8J	4	24.80	1.55	33.24	2.19	2.50

4.5.1.3 Resultados da placa 3C4

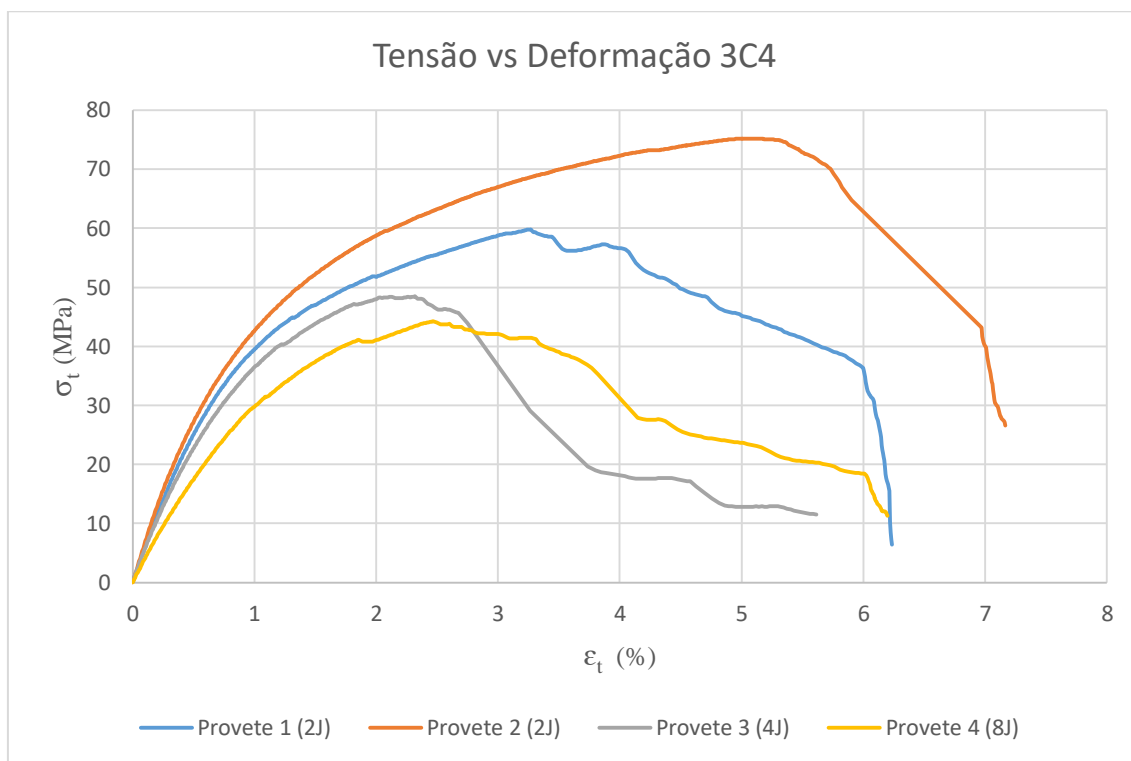


Figura 73 - Curva Tensão vs Deformação (3C4).

Os provetes da placa 3C4 sujeitos a impactos de energia mais elevada também apresentaram propriedades mecânicas mais baixas nos ensaios de tração. A tensão máxima reduziu cerca de 28% de 2 para 4J de energia de impacto e 9% de 4 para 8J. Já o módulo de elasticidade reduziu 15% de 2 para 4J de energia de impacto e 24% de 4 para 8J.

Tabela 38 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa 3C4.

	Provete	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ _t (MPa)	Deformação ε _t (%)	Módulo E _t (GPa)
2J	1	23.61	1.53	59.79	3.25	5.54
	2	24.98	1.55	75.23	5.13	6.06
4J	3	24.94	1.56	48.45	2.32	4.93
8J	4	24.74	1.57	44.20	2.47	3.76

4.5.1.4 Resultados da placa 2C3

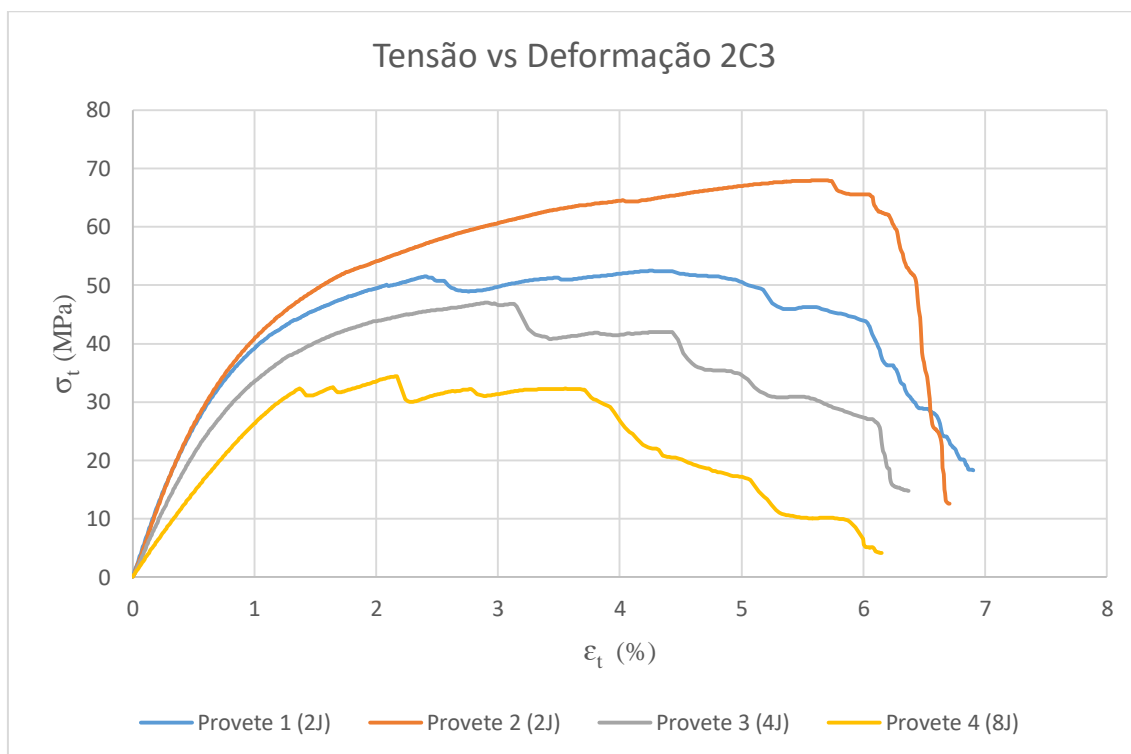


Figura 74 - Curva Tensão vs Deformação (2C3).

Os provetes da placa 2C3 sujeitos a impactos de energia mais elevada também apresentaram propriedades mecânicas mais baixas nos ensaios de tração. A tensão máxima reduziu cerca de 22% de 2 para 4J de energia de impacto e 27% de 4 para 8J. Já o módulo de elasticidade reduziu 22% de 2 para 4J de energia de impacto e 35% de 4 para 8J.

Tabela 39 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa 2C3.

	Provete	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ _t (MPa)	Deformação ε _t (%)	Módulo E _t (GPa)
2J	1	25.05	1.55	52.49	4.27	5.84
	2	24.73	1.55	68.01	5.69	5.96
4J	3	24.82	1.55	47.07	2.90	4.63
8J	4	24.77	1.59	34.43	2.17	3.01

4.5.1.5 Resultados da placa C2C

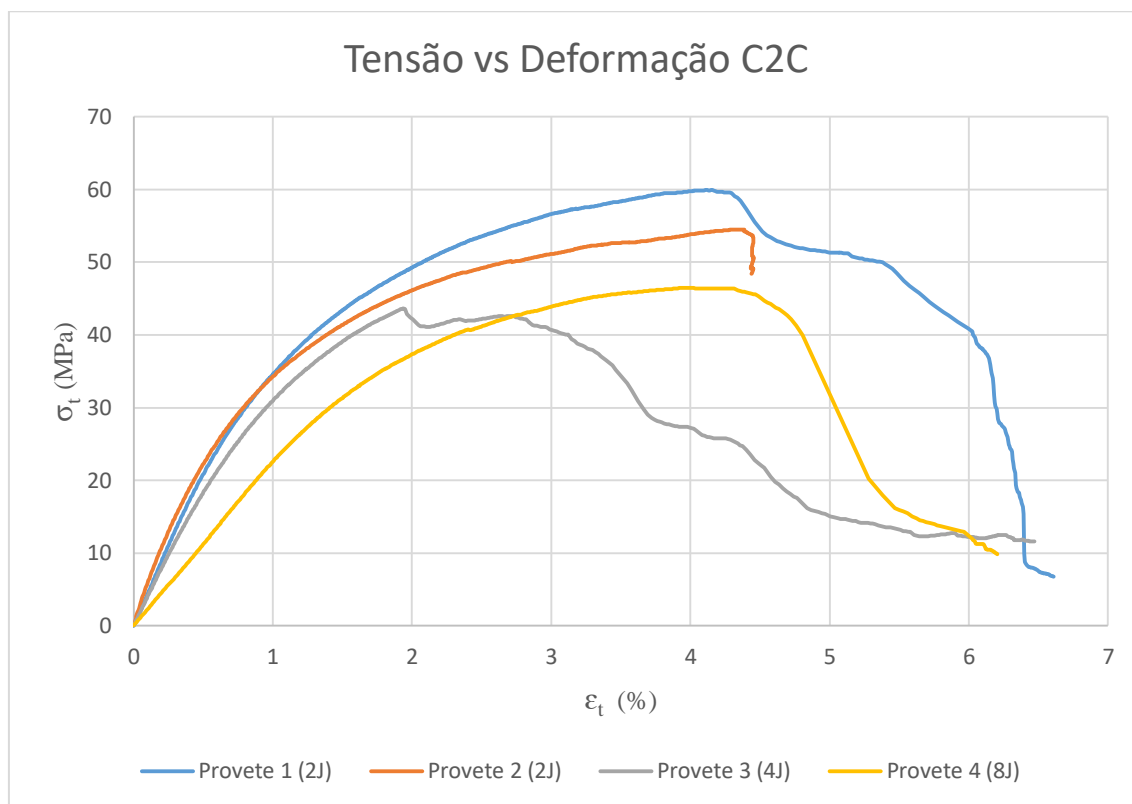


Figura 75 - Curva Tensão vs Deformação (C2C).

Os provetes da placa C2C sujeitos a um impacto de 2J de energia apresentaram propriedades mecânicas mais elevadas nos ensaios de tração do que os sujeitos a impactos de maior energia. No entanto o provete 3, impactado com 4J, apresentou uma tensão máxima inferior à do provete 4, impactado com 8J, o que se deveu a uma quebra anómala do provete 3, próxima dos 3% de deformação.

Tabela 40 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa C2C.

	Provete	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ _t (MPa)	Deformação ε _t (%)	Módulo E _t (GPa)
2J	1	24.97	2.07	59.91	4.16	4.51
	2	22.87	2.01	54.51	4.39	4.88
4J	3	24.91	2.09	43.60	1.94	3.92
8J	4	24.80	1.95	46.48	3.98	2.24

4.5.1.6 Resultados da placa C3C

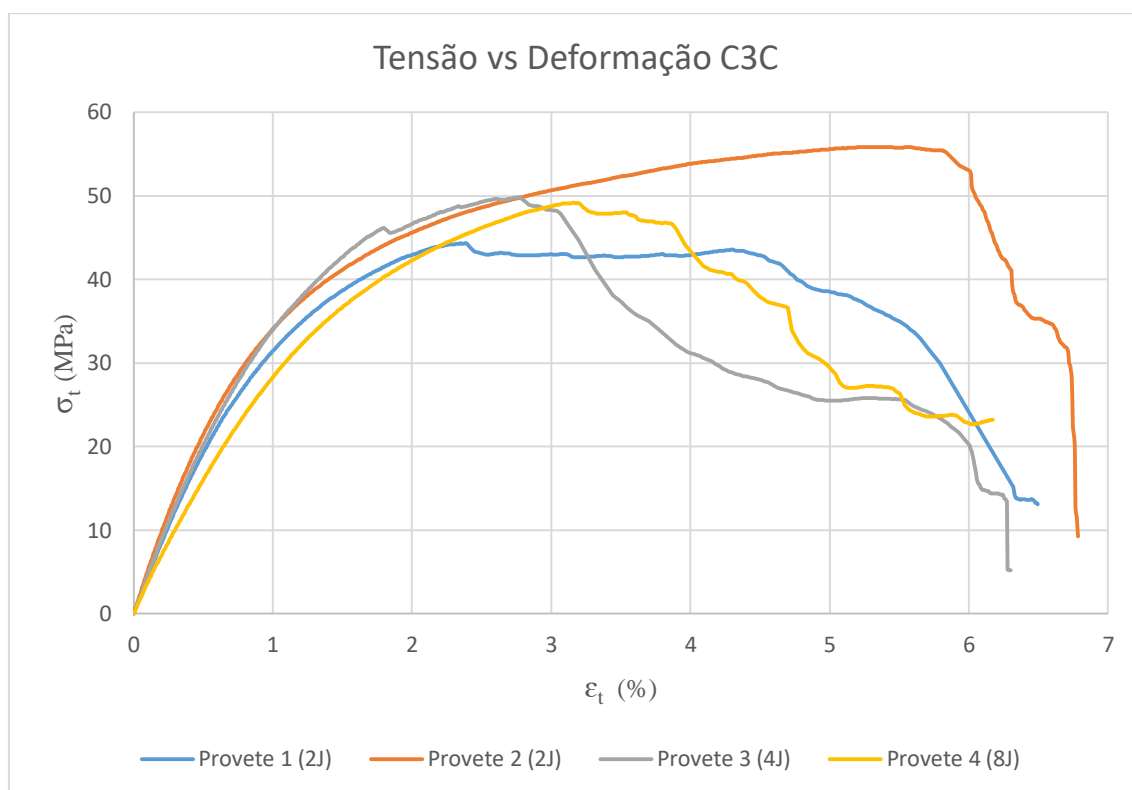


Figura 76 - Curva Tensão vs Deformação (C3C).

No caso da placa C3C (cuja posição da cortiça era mais próxima da zona de impacto) não se verificou uma variação significativa na tensão máxima atingida pelos provetes quando ensaiados à tração. Já o módulo de elasticidade foi substancialmente mais afetado, reduzindo cerca de 2% de 2 para 4J de energia de impacto e 24% de 4 para 8J.

Tabela 41 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa C3C.

	Provete	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ _t (MPa)	Deformação ε _t (%)	Módulo E _t (GPa)
2J	1	25.16	2.00	44.31	2.39	4.17
	2	21.59	2.05	55.85	5.41	4.72
4J	3	24.94	2.12	49.83	2.78	4.36
8J	4	24.80	2.09	49.18	3.17	3.33

4.5.1.7 Resultados da placa C23C

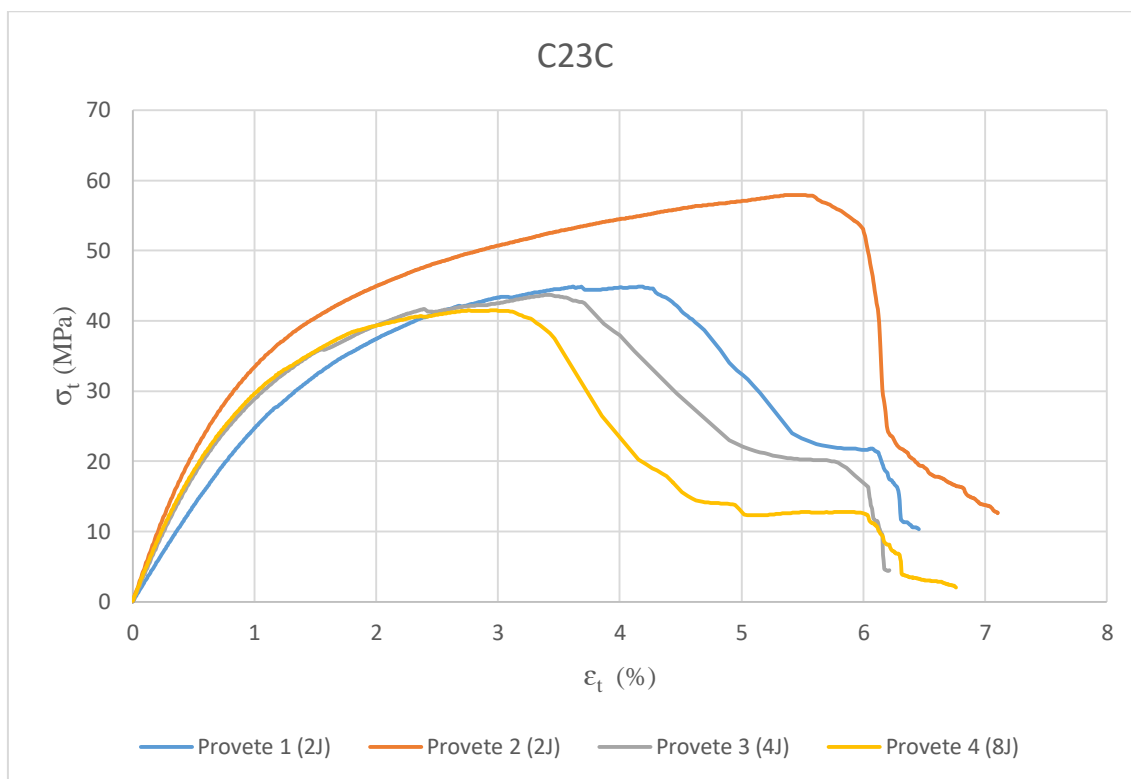


Figura 77 - Curva Tensão vs Deformação (C23C).

Os provetes da placa C23C sujeitos a um impacto de 2J de energia apresentaram propriedades mecânicas mais elevadas nos ensaios de tração do que os sujeitos a impactos de maior energia (considerando que pelo menos o valor do módulo de elasticidade do provete 1 tenha sido anômalo). De notar ainda que o valor do módulo para um impacto de 8J foi superior ao de 4J.

Tabela 42 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa C23C.

	Provete	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_t (MPa)	Deformação ϵ_t (%)	Módulo E_t (GPa)
2J	1	25.23	2.05	44.87	3.62	2.82
	2	24.83	2.05	57.93	5.43	4.73
4J	3	24.93	1.98	43.72	3.44	3.92
8J	4	25.08	2.05	41.48	3.00	4.09

4.5.1.8 Resultados da placa C2C3C

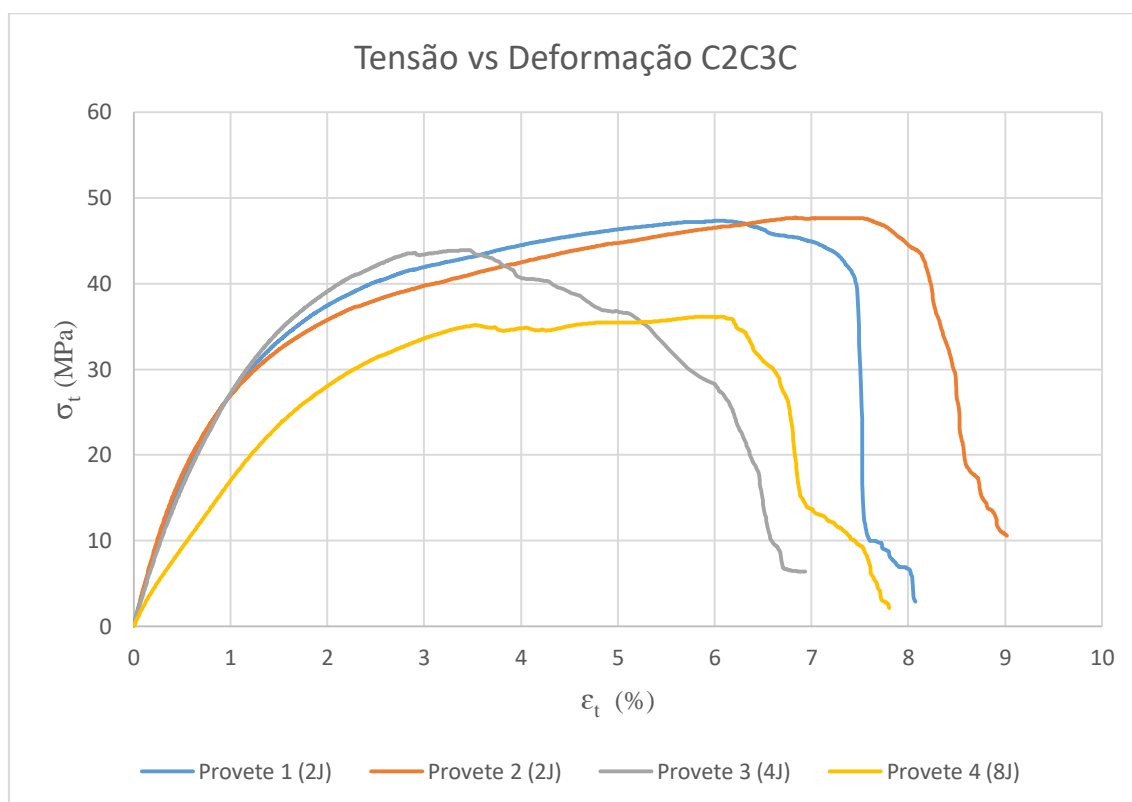


Figura 78 - Curva Tensão vs Deformação (C2C3C).

Para a solução com o maior número de filmes de cortiça, C2C3C, verificou-se que a tensão máxima à tração reduziu cerca de 8% de 2 para 4J de energia de impacto e 18% de 4 para 8J. Já o módulo de elasticidade reduziu 5% de 2 para 4J de energia de impacto e 45% de 4 para 8J.

Tabela 43 - Valores dos provetes dos ensaios TAI da placa C2C3C.

	Provete	Largura b (mm)	Espessura h (mm)	Tensão σ_t (MPa)	Deformação ϵ_t (%)	Módulo E_t (GPa)
2J	1	22.69	2.40	47.37	6.10	3.47
	2	25.16	2.34	47.69	6.82	4.05
4J	3	25.21	2.42	43.94	3.48	3.56
8J	4	24.75	2.37	36.16	5.70	1.97

4.5.2 Análise dos resultados dos ensaios TAI

Os resultados de tração após impacto seguem o mesmo padrão dos resultados de tração sem impacto, embora com valores inferiores, como se pode ver na **Figura 79**. A placa de referência C0, mesmo após impacto, continua a apresentar propriedades mecânicas mais elevadas do que as placas com cortiça. De ressaltar ainda que de todos os provetes sujeitos a impacto antes de serem tracionados, o provete da placa C0 sujeito a um impacto de 8J foi o único a sofrer perfuração (ver **Figura 81-A**). No entanto, apesar da perfuração, a sua tensão máxima e módulo de elasticidade continuam a ser largamente superiores aos das restantes placas.

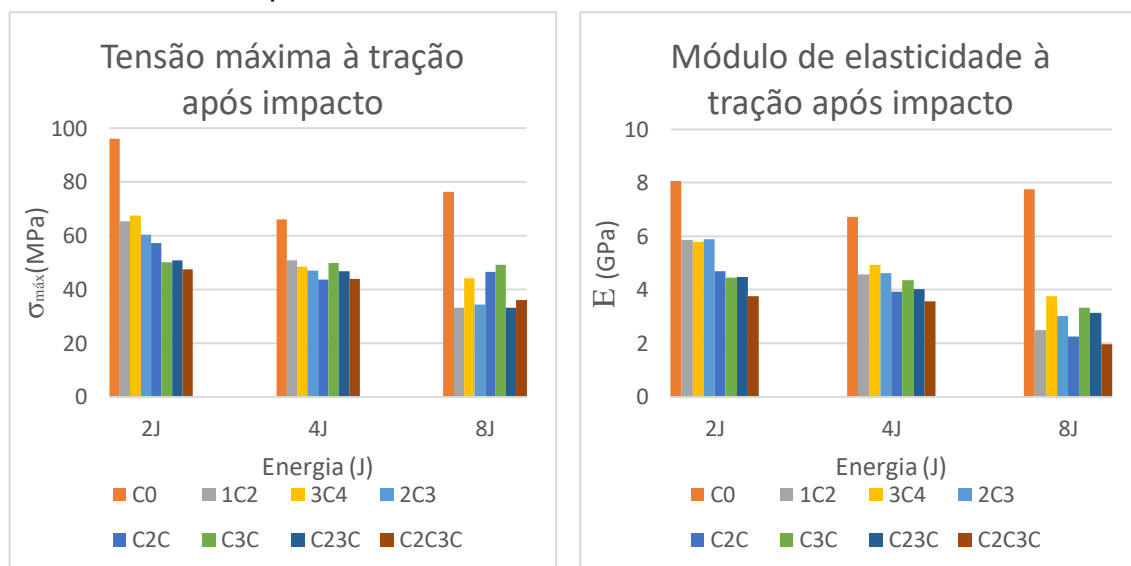


Figura 79 - Comparação da tensão máxima e módulo de elasticidade à tração após impacto.

Dentro do grupo das placas com cortiça percebe-se também que com o aumento da energia de impacto os resultados tornam-se mais distintos. Por exemplo, a tensão máxima atingida pela placa C2C3C após um impacto de 8J é superior à da registada para algumas placas com um e dois filmes de cortiça, o que não acontece nos níveis inferiores de energia ensaiados. Também se pode verificar que para 8J, tanto em relação à tensão máxima como ao módulo de elasticidade, as placas 3C4 e C3C apresentaram valores mais elevados do que as suas homólogas 1C2 e C2C, respetivamente. O que nem sempre aconteceu para os

valores de energia inferiores, denotando uma maior influência da posição do filme de cortiça nas propriedades mecânicas após impacto. Vindo desta forma solidificar os resultados obtidos nos ensaios de impacto onde se concluiu que, posicionando o filme de cortiça mais próximo da face impactada, permitiria absorver grandes quantidades de energia “à entrada” da placa e assim proteger as camadas adjacentes da mesma.

Sabe-se, *a priori*, que um impacto reduz, de uma forma geral, as propriedades mecânicas de um laminado, importa saber agora qual a dimensão dessa redução e se essa redução é maior ou menor nas placas com cortiça.

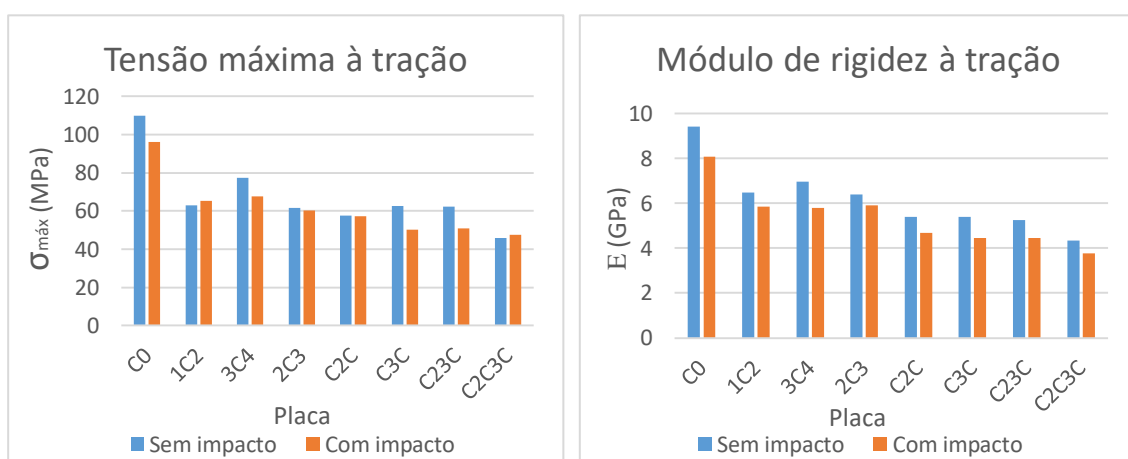


Figura 80 - Tensão máxima e módulo de elasticidade à tração, com e sem impacto (2J).

Analisando a **Figura 80** com a ajuda da **Tabela 44**, composta pelas percentagens de redução da tensão máxima e módulo de elasticidade de cada placa após um impacto de 2J, verifica-se que as placas C3C e C23C foram as mais afetadas pelo impacto. Constata-se ainda que cinco das sete placas que continham cortiça tiveram uma redução de tensão máxima igual ou inferior à da placa de referência C0. Inclusive nas placas 1C2 e C2C3C a tensão máxima após impacto aumentou ligeiramente. Ou seja, para este nível de energia a introdução da cortiça revelou-se vantajosa no sentido da preservação da tensão máxima do material. Quanto ao módulo de elasticidade, apesar de três placas apresentarem reduções maiores do que a placa de referência, a diferença de valores não é significativa, sendo no máximo de três pontos percentuais.

Tabela 44 - Redução da tensão máxima e módulo de elasticidade após um impacto de 2J.

2J	C0	1C2	3C4	2C3	C2C	C3C	C23C	C2C3C
σ (%)	13	-4	13	2	0	20	19	-4
E (%)	14	9	17	8	13	17	15	13

Para impactos de 4J os resultados foram ainda mais animadores. Como se pode verificar pela análise da **Tabela 45** todas as placas com um ou mais filmes de cortiça apresentaram reduções, tanto de tensão máxima como de módulo de elasticidade, inferiores à da placa de referência. Além disso, e em média, verifica-se que as placas com mais filmes de cortiça apresentaram menores reduções destas duas propriedades mecânicas. O que permite concluir que para impactos desta ordem de grandeza de energia a introdução de cortiça revela-se vantajosa.

Tabela 45 - Redução da tensão máxima e módulo de elasticidade após um impacto de 4J.

4J	C0	1C2	3C4	2C3	C2C	C3C	C23C	C2C3C
σ (%)	40	19	37	24	24	20	25	4
E (%)	29	29	29	28	27	19	23	18

Para impactos de 8J, como também já se tinha visto na **Figura 79**, os resultados foram mais distintos. É perceptível, através de uma análise da **Tabela 46**, uma inversão da tendência, com as placas com cortiça na sua composição a apresentarem, na sua maioria, maiores reduções nas propriedades mecânicas analisadas após o impacto. Embora este aspeto se tenha evidenciado mais nos valores do módulo de elasticidade, onde todas as placas apresentaram reduções superiores. No entanto, se focarmos a análise apenas na tensão máxima irá verificar-se que, em média, as soluções com maior número de filmes de cortiça (2 e 3) apresentaram reduções inferiores às da placa de referência. Como já havia acontecido nos níveis mais baixos de energia.

Verificou-se ainda que, para este nível de energia, a variável posição do filme de cortiça foi mais relevante do que a variável existência de filmes de cortiça. Por exemplo, as placas 3C4 e C3C apresentaram reduções inferiores às das suas homólogas 1C2 e C2C, respetivamente. Exceção feita para o valor de tensão máxima da placa C3C em relação à C2C, mas, uma vez que a diferença é

mínima e como foi ensaiado apenas um provete, não é relevante. Por fim, destaque para o valor da redução da tensão máxima na solução com o maior número de filmes de cortiça, apresentando esta placa, em todos os níveis ensaiados, uma redução inferior à da placa de referência.

Tabela 46 - Redução da tensão máxima e módulo de elasticidade após um impacto de 8J.

8J	C0	1C2	3C4	2C3	C2C	C3C	C23C	C2C3C
σ (%)	31	47	43	44	19	21	47	21
E (%)	18	61	46	53	58	38	40	55

Na **Figura 81** é possível visualizar as imagens dos provetes impactados com 8J (**A**), com destaque para a diferença entre a placa C0 e 1C2 onde se pode ver a não ocorrência de perfuração a partir da introdução de cortiça no laminado.

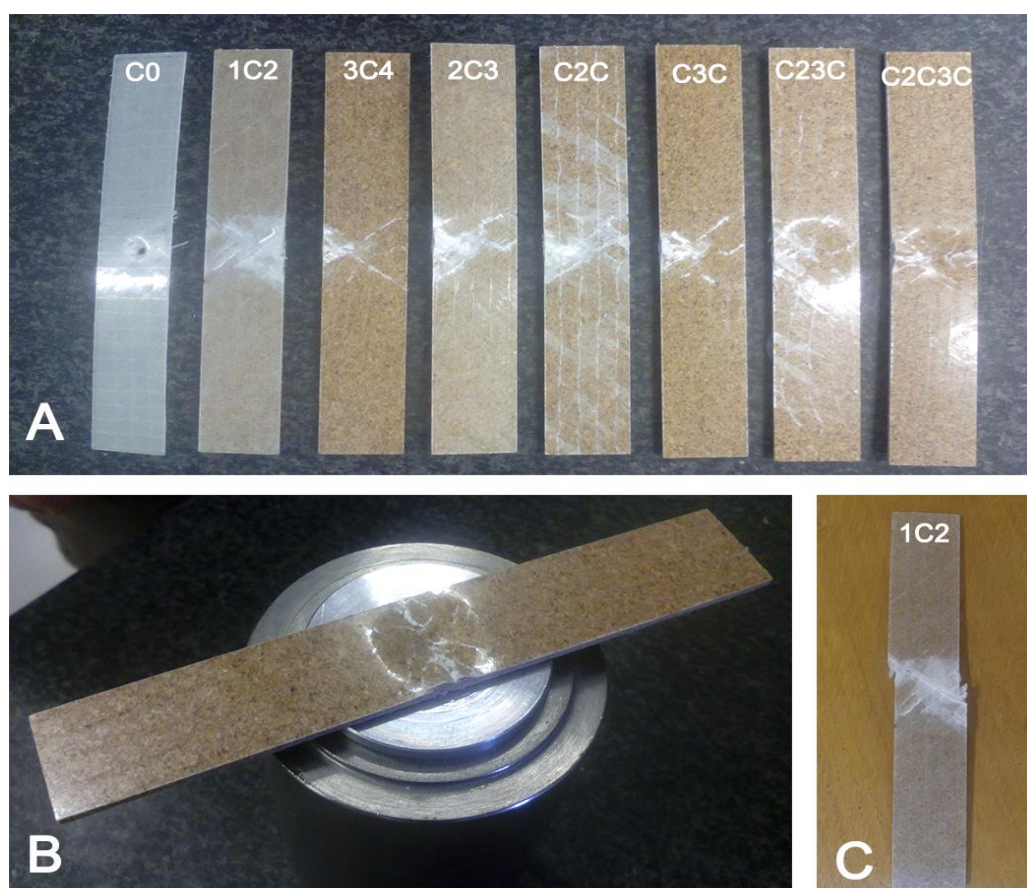


Figura 81 - A - Provetes TAI impactados (8J); B - Provede posicionado no suporte fabricado propositadamente para o ensaio; C - Provede tracionado após impacto.

Página intencionalmente deixada em branco.

5 CONCLUSÃO

Esta dissertação teve como principal objetivo a avaliação da influência da cortiça numa estrutura compósita, neste caso um laminado, nomeadamente no que diz respeito ao comportamento ao impacto e na tolerância ao dano. A execução deste trabalho dividiu-se em três fases: a primeira fase consistiu na produção das placas e posterior preparação dos provetes, que decorreu nas instalações do INEGI; a segunda fase foi a realização dos ensaios, que se dividiu entre o INEGI e o Laboratório de Ensaios Tecnológicos da FEUP; por fim, a terceira fase consistiu no tratamento dos dados e análise dos resultados.

O facto do número de provetes para alguns ensaios ter de ser reduzido em relação ao estipulado pelas normas seguidas, pode ter influenciado ligeiramente os resultados e conclusões finais, que se apresentam de seguida:

- Após analisados os resultados dos ensaios de flexão em três pontos concluiu-se que, como seria de esperar, a placa sem qualquer cortiça apresentava as propriedades mecânicas mais elevadas. Dentro do grupo das soluções com cortiça as que tinham os filmes de cortiça mais afastados da zona de carregamento eram as que apresentavam propriedades mecânicas mais elevadas, que foi o caso da 3C4 e C3C. A placa C2C3C revelou-se a solução com as propriedades mecânicas menos vantajosas;
- No que respeita aos ensaios de tração, a posição dos filmes de cortiça perde alguma importância. Neste ensaio, também sem surpresas, a placa de referência apresentou propriedades mecânicas mais elevadas, e a placa com o maior número de filmes de cortiça, as mais baixas. Dentro do grupo das soluções com cortiça, as placas com um só filme apresentaram propriedades mecânicas mais elevadas do que as restantes;
- Nos ensaios de impacto concluiu-se que a existência de filmes de cortiça próximos da zona de impacto foi determinante para a existência ou não de quebra do provete, e que as placas 1C2 e 2C3 foram as que mais energia de impacto absorveram. Neste aspeto, a placa C2C3C também

apresentou bons resultados além do facto de ter registado a maior indentação de todas as placas. Este pormenor é de extrema importância porque ao apresentar maior indentação após um impacto permitirá detetar o dano mais facilmente por inspeção visual, ganhando assim especial relevo em questões de tolerância ao dano. Como se sabe, o dano invisível é o mais perigoso;

- Nos ensaios de tração após impacto, e em termos de perda de propriedades, as soluções com cortiça revelaram-se, de uma forma geral e para os impactos de 2 e 4J, uma boa solução. Estas soluções apresentaram, em média, perdas inferiores às da placa de referência C0. No conjunto dos ensaios nestas duas energias a placa C2C3C revelou-se a mais vantajosa ao ser a que melhor preservou as suas propriedades mecânicas após o impacto.

Conclui-se então que a principal desvantagem da introdução da cortiça num compósito laminado é a redução considerável das suas propriedades mecânicas. E a principal vantagem é que, segundo os resultados obtidos, a introdução da cortiça num laminado atenua a redução das suas propriedades mecânicas após um impacto de baixa energia. A desvantagem desta redução pode ser compensada aumentando o número de camadas de fibra de vidro nas placas com cortiça, com o objetivo de atingir os valores pretendidos. Naturalmente que tem de novo outra desvantagem que é o aumento do preço e da dimensão da estrutura, faltando apenas conseguir um bom equilíbrio entre estes aspetos.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Tendo em conta os resultados obtidos, as análises feitas e as conclusões tiradas sugerem-se os seguintes trabalhos futuros, tanto para consolidar os resultados obtidos neste trabalho como para lhes dar seguimento:

- Realização de ensaios TAI com maior número de provetes, em mais níveis de energia e com as dimensões mais semelhantes aos provetes de

tração, para melhorar o coeficiente de comparação. E ainda a realização de ensaios de compressão após impacto;

- Experimentar uma solução com a cortiça na camada exterior, uma placa com a configuração 1234C;
- Aplicação de um tratamento químico adequado na superfície da cortiça para melhorar as forças de ligação e consequentemente diminuir a influência negativa que tem nas propriedades mecânicas do laminado;
- Aproximar as propriedades mecânicas de uma placa com cortiça às de uma placa sem cortiça acrescentando camadas de fibra e, uma vez eliminada a discrepância de valores de propriedades entre placas com e sem cortiça, impactar ambas as placas e avaliar de novo a redução de propriedades;
- Experimentar um equilíbrio entre a placa C0 e a C2C3C.

Página intencionalmente deixada em branco.

6 BIBLIOGRAFIA

1. Daniel, I. M. & Ishay, O. *Engineering Mechanics Of Composite Materials*. (Oxford University Press, 2006).
2. Callister, W. & Rethwisch, D. *Materials science and engineering: an introduction*. (John Wiley & Sons, Inc., 2007).
3. S.T. Peters. *Handbook Of Composites*. (Chapman & Hall, 1998).
4. *Composite Materials Handbook*. Volume 6. (SAE International, 2013).
5. Soares, C. A. M., Soares, C. M. M. & Freitas, M. J. M. *Mechanics Of Composite Materials And Structures*. (IDMEC/IST, 1998).
6. Quartus Engineering, 2015. Disponível em <<http://www.quartus.com/>>. Acedido em 21 abril 2016.
7. Gay, D., Hoa, S. V & Tsai, S. W. *Composite Materials Composite Materials*. (CRC Press LLC, 2003).
8. Agarwal, B. D. & Broutman, L. J. *Analysis and performance of fiber composites*. (Wiley Interscience, 1990).
9. Prince Engineering, 2015. Disponível em <<http://www.build-on-prince.com/>>. Acedido em 20 julho 2016.
10. D. Menczel, J. & Bruce Prime, R. *Thermal Analysis Of Polymers*. (John Wiley & Sons, Inc., 2009).
11. AZO Materials, 2016. Disponível em <<http://www.azom.com/>>. Acedido em 20 julho 2016.
12. Silva, S. P. *et al.* Cork : properties , capabilities and applications. **50**, 345–365 (2005).
13. Amorim. Disponível em <<http://www.amorim.com/a-cortica/caracteristicas/>>. Acedido em 7 março 2016.
14. Gil, L. Cork Composites: A Review. 776–789 (2009).
15. APCOR, 2015. Disponível em <<http://www.apcor.pt/>>. Acedido em 8 março 2016.
16. Jacob, M. & Council, J. Hybrid composites. (2016).
17. Eires, R., Nunes, J. P., Figueiro, R., Jalali, S. & Camões, A *New Eco-Friendly Hybrid Composite Materials For Civil Construction*.

18. Fowler, P. A., Hughes, J. M. & Elias, R. M. Biocomposites: technology, environmental credentials and market forces. *J. Sci. Food Agric.* 1781–1789 (2006).
19. Fernandes, E. M., Correlo, V. M., Mano, J. F. & Reis, R. L. Cork – polymer biocomposites : Mechanical , structural and thermal properties. *Mater. Des.* **82**, 282–289 (2015).
20. John, M. J. & Thomas, S. Biofibres and biocomposites. **71**, 343–364 (2008).
21. Composites Lab, 2015. Disponível em <<http://www.compositeslab.com/>>. Acedido em 6 agosto 2016.
22. Reid, S. R. & Zhou, G. *Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures*. (Woodhead Publishing Ltd, 2000).
23. Ramesh, T. & Varna, J. *Modeling Damage , Fatigue and Failure of Composite Materials*. (Elsevier Ltd, 2016).
24. Jr, L. M. *Computational Mesomechanics of Composites*. (John Wiley & Sons Ltd, 2007).
25. Abrate, S. *Impact On Composite Structures*. (Cambridge University Press, 1998).
26. Silberschmidt, V. V. *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures*. (Elsevier Ltd., 2016).
27. Nu-Cork, 2015. Disponível em <<http://www.nucork.in/>>. Acedido em 9 março 2016.
28. Farahmand, B. *Virtual Testing and Predictive Modeling*. (Springer, 2009).
29. Ballère L. et al. Damage tolerance of impacted curved panels – International Journal of Impact Engineering - Vol. 36, p.243-253 – 2008.